



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKA SAUKKONEN
KAAPELOINNIN EROTTELUPERIAATTEET YDINVOIMALAITOK-
SILLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori
Pertti Järventausta
Ohjaaja: DI Samuli Hankivuo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa
29. maaliskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

MIKA SAUKKONEN: Kaapeloinnin erotteluperiaatteet ydinvoimalaitoksilla
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 85 sivua, 12 liitesivua
Toukokuu 2017
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat
Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: ydinvoimalaitos, kaapelointi, erottelu, erotteluperiaatteet

Suomalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuusjärjestelmien kaapeloinnin erotteluun kohdistuu monia viranomaisvaatimuksia, joiden toteuttaminen käytännössä ja valvonta on hankalaa. Tämän työn tarkoituksena on perehtyä kyseisiin vaatimuksiin ja pohtia perusteita vaatimusten toteuttamiseen käytännössä tulevissa suomalaisissa ydinvoimalaitoksissa.

Tärkeimmät vaatimukset suomalaisten ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erottelulle esitetään kansallisissa YVL-ohjeissa. YVL-ohjeet vaativat erottelemaan kaapeleita syvyys-suuntaisen puolustuksen tasojen, turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisten osajärjestelmien, jänniteluokkien sekä turvallisuusluokkien välillä. Syvyys-suuntaisen puolustuksen tasojen erottelulla pyritään varmistamaan tasojen riippumattomuus toisistaan ja tätä kautta estämään usean puolustustason yhtäaikainen pettäminen. Turvallisuusjärjestelmät jaetaan useampaan rinnakkaiseen toisistaan eroteltuun osajärjestelmään turvallisuustoimintojen luotettavuuden parantamiseksi. Jänniteluokkien erottelulla estetään sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen. Turvallisuusluokkien erottelulla estetään alemman turvallisuusluokan järjestelmän, laitteen tai kaapelin haitalliset vaikutukset ylemmän turvallisuusluokan järjestelmään, laitteeseen tai kaapeliin.

Tarkemmat toimenpiteet erottelun toteuttamiseksi tulevat YVL-ohjeiden vaatimusten mukaan sovelletusta ydinteknisestä standardista. YVL-ohjeiden ja standardien vaatimukset ovat osittain päällekkäisiä ja ne perustuvat yleensä erilaiseen vaatimustasoon. Tästä syystä vaatimusten yhdistäminen on paikoin hankalaa.

Aluksi työssä esitellään ydinvoimalaitoksen yleiset suunnitteluperiaatteet, kaapelointiin liittyvä tekniikka, ydinvoimalaitoksen tyypilliset kaapelointijärjestelmät sekä kaapeloinnin suojaus. Tämän jälkeen tarkastellaan, mitä vaatimuksia kaapeloinnin erotteluun kohdistuu. Lopuksi esitetään yhteenveto erotteluvaatimuksista ja pohditaan perusteita vaatimusten soveltamiseen käytännössä.

Työssä havaittiin, että vaatimukset, jotka koskevat turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisien osajärjestelmien ja jänniteluokkien erottelua, ovat varsin selkeitä ja yksikäsitteisiä. Vaatimukset koskien syvyys-suuntaisten puolustustasojen ja turvallisuusluokkien erottelua vaativat tapauskohtaisempaa tarkastelua.

ABSTRACT

MIKA SAUKKONEN: Cable separation principles in nuclear power plants

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 85 pages, 12 Appendix pages

May 2017

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power systems and market

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: Nuclear power plant, Cabling, Separation, Separation principles

Cable separation in Finnish nuclear power plants (NPP) face many regulatory requirements. Application and surveillance of these requirements in practice is difficult. The purpose of this thesis is to take a look on requirements considering cable separation and ponder premises for applying the requirements in practice in future Finnish NPPs.

The most important requirements for cable separation in Finnish nuclear power plants are set in national YVL-guides. The YVL-guides require cable separation between levels of defence in depth (DiD-levels), safety systems' redundant subsystems (redundancies), voltage classes and safety classes. By separating cables of different DiD-levels one can ensure independence of the levels and prevent coincidental loss of multiple levels. Safety systems are divided and separated into multiple subsystems to ensure reliable actualization of safety functions. Separation of voltage classes prevents spreading of electromagnetic interferences. By separating safety classes one can prevent harmful effects from lower safety classified system, apparatus or cable to upper safety class.

More detailed measures for fulfilling the requirements set in YVL-guides are presented in nuclear technical standards. The requirements set in the YVL guides and in the standards are partially overlapping and usually the requirements are based on different requirement level. Therefore it is sometimes difficult to combine these requirements.

At first the thesis introduces general design principles of NPPs, cabling techniques, typical cabling systems of NPP and protection of those. After this the requirements considering cable separation in Finnish NPPs are presented. Finally a conclusion of cable separation requirements is presented with discussion of the basis behind the requirements.

The thesis shows that requirements that concern separation of redundancies and voltage classes are quite clear. Requirements considering separation of DiD-levels and safety classes require more case-by-case analysis.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Säteilyturvakeskuksen Ydinvoimalaitosten valvonta –osaston Sähkö- ja automaatiojärjestelmät –toimistolle keväällä 2017. Työn ohjaajana toimi DI Samuli Hankivuo ja tarkastajana professori Pertti Järventausta Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Haluan kiittää koko Sähkö- ja automaatiojärjestelmät –toimistoa mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja vilpittömästä avusta työtä tehdessä. Kiitos myös muille Ydinvoimalaitosten valvonta –osaston työntekijöille, jotka antoivat omaa asiantuntevaa näkemystään työn edetessä. Erityiskiitokset haluan osoittaa työni ohjaajalle Samulille, joka talonrakentamisen ja muiden kiireidensä ohella ehti auttamaan minua kaikissa tilanteissa. Kiitokset myös professori Pertti Järventaustalle työn huolellisesta tarkastamisesta sekä voimayhtiöiden edustajille omien näkemystensä jakamisesta.

Kiitos perheelleni kaikesta tuesta ja kannustuksesta, jonka avulla olen tähän asti päässyt. Kiitos myös kaikille ystäville ja opiskelutovereille opiskelutaakan keventämisestä ja unohtumattomista opiskeluvuosista.

Helsingissä, 12.5.2017

Mika Saukkonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	YDINVOIMALAITOKSEN SUUNNITTELUPERIAATTEET	4
2.1	Syvyyssuuntainen puolustus	5
2.2	Suunnitteluperusteluokat	7
2.3	Turvallisuusluokat	8
2.4	Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperiaatteet	8
2.4.1	Vikakriteerit	9
2.4.2	Rinnakkaisperiaate (<i>redundancy</i>)	9
2.4.3	Erotteluperiaate (<i>separation</i>)	10
2.4.4	Erilaisuusperiaate (<i>diversity</i>)	11
2.4.5	Turvallisen tilan periaate	11
2.4.6	Yhteenveto	12
2.5	Turvallisuuden arviointi	13
2.5.1	Deterministiset analyysit	13
2.5.2	Todennäköisyysperusteiset analyysit	13
3.	KAPELOINNIN TEKNIikka	14
3.1	Kaapelityypit ja kaapelien rakenne	14
3.1.1	Voimakaapelit	14
3.1.2	Ohjauskaapelit	16
3.1.3	Instrumentointikaapelit	16
3.1.4	Tiedonsiirtokaapelit	17
3.1.5	Erikoiskaapelit	18
3.2	Sähkötekniset ilmiöt	18
3.2.1	Kuormitettavuus	18
3.2.2	Terminen oikosulkukestoisuus	18
3.2.3	Dynaaminen oikosulkukestoisuus	19
3.2.4	Jännitteenalenema	19
3.2.5	Jännitteenkestävyys	19
3.2.6	Sähkömagneettiset häiriöt	20
3.3	Kaapeloinnin asennustavat	24
3.3.1	Kaapelihyllyt	25
3.3.2	Kaapelikanavat	26
3.3.3	Kaapelilattiat	26
3.3.4	Läpiviennit	27
3.3.5	Kaapelipäätteet	28
3.3.6	Maadoitus	28
4.	YDINVOIMALAITOKSEN KAAPELIJÄRJESTELMÄT	29
4.1	Omakäyttösähköjärjestelmät	29
4.1.1	Normaalit sähkönjakelujärjestelmät	31

4.1.2	Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät	31
4.1.3	Erikoisvarmennetut sähkönjakelujärjestelmät (UPS)	32
4.1.4	Sähkölaitteiden suojaus	33
4.2	Automaatiojärjestelmät	34
5.	YDINVOIMALAITOKSEN KAAPELOINNIN SUOJAUS SISÄISIÄ JA ULKOISIA UHKIA VASTAAN	35
5.1	Layout-suunnittelu	35
5.2	Sisäiset uhat	36
5.2.1	Tulipalot	36
5.2.2	Räjähdykset	38
5.2.3	Sähkömagneettiset häiriöt	39
5.2.4	Radioaktiivinen säteily	42
5.2.5	Mekaaniset uhat	43
5.2.6	Sisäiset tulvat	43
5.3	Ulkoiset uhat	43
5.3.1	Maanjäristys	43
5.3.2	Salamat	44
5.3.3	Lentokoneen törmäys	44
5.3.4	Ulkoiset tulvat	44
6.	VAATIMUKSET YDINVOIMALAITOSTEN KAAPELOINNIN EROTTELULLE	45
6.1	Ydinenergialaki	46
6.2	Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta	47
6.3	YVL-ohjeet	47
6.3.1	YVL B.1 Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu	48
6.3.2	YVL E.7 Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet	50
6.3.3	YVL B.7 Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa 50	
6.3.4	YVL B.8 Ydinlaitoksen palontorjunta	51
6.4	IAEA	52
6.4.1	IAEA SSR-2/1	52
6.4.2	IAEA SSG-34	53
6.4.3	IAEA SSG-39	55
6.5	IEEE	55
6.5.1	IEEE 690-2004	56
6.5.2	IEEE 384-2008	57
6.6	IEC	63
6.6.1	IEC 61226:2009	64
6.6.2	IEC 60709:2004	64
6.6.3	IEC 61000-5-2:1997	67
6.7	KTA	68
6.7.1	KTA 3701 (6/99)	68

6.7.2	KTA 3705 (11/2006).....	68
6.7.3	KTA 3501 (1985-06)	69
6.8	Yhteenveto	69
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	73
7.1	Syvyys-suuntaisen puolustuksen tasojen erottelu.....	73
7.2	Rinnakkaisten osajärjestelmien erottelu.....	74
7.3	Jänniteluokkien erottelu	75
7.4	Turvallisuusluokkien erottelu.....	76
7.5	Kaapeloinnin erotteluperiaatteet käytännössä.....	77
8.	YHTEENVETO	81
	LÄHTEET.....	82
	LIITE A: OLKILUOTO 1 JA 2 -YKSIKÖIDEN PÄÄKAAVIO [53].....	86
	LIITE B: OLKILUOTO 3 -YKSIKÖN PÄÄKAAVIO [8]	87
	LIITE C: DIDELSYS – SYVYYSSUUNTAINEN PUOLUSTUS SÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ	88
	LIITE D: YVL-OHJEIDEN VAATIMUKSET KAAPELOINNIN EROTTELULLE..	93

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Syvyysuuntaisen puolustuksen tasot [7]</i>	6
Kuva 2.	<i>Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden vapautumista estävät fyysiset esteet [8]</i>	7
Kuva 3.	<i>N+2 –vikakriteerin toteuttavat rinnakkaiset pumpput [5]</i>	10
Kuva 4.	<i>Fyysisellä esteellä erotellut pumpput [5]</i>	11
Kuva 5.	<i>Erilaisuusperiaatetta toteuttavat keskipako- ja mäntäpumppu [5]</i>	11
Kuva 6.	<i>Turvallisuusjärjestelmien turvallisuusluokan ja vikakriteerin määräytyminen suunnitteluperusteluokittain [12]</i>	12
Kuva 7.	<i>AHXCMK-yksijohdinkaapeli [13]</i>	15
Kuva 8.	<i>N2XCH-asennuskaapeli [16]</i>	16
Kuva 9.	<i>MKMO-ohjauskaapeli [18]</i>	16
Kuva 10.	<i>KJAAM-HF-instrumentointikaapeli [19]</i>	17
Kuva 11.	<i>RG-59 -koaksiaalikaapeli [20]</i>	17
Kuva 12.	<i>Palonkestävä valokuitukaapeli [21]</i>	17
Kuva 13.	<i>KLM 4X0,8 R100 -telekaapeli [22]</i>	17
Kuva 14.	<i>Kaapelin eristyksen sähkökentänvoimakkuuteen vaikuttavat tekijät</i>	20
Kuva 15.	<i>Kaapeloinnin tyypillinen häiriöketju</i>	21
Kuva 16.	<i>Häiriön kapasitiivinen kytkeytyminen 1 [23]</i>	21
Kuva 17.	<i>Häiriön induktiivinen kytkeytyminen [23]</i>	22
Kuva 18.	<i>Häiriintyvän piirin muodostama pinta-ala [23]</i>	23
Kuva 19.	<i>Kaapeloinnin hyllyasennus kaapelitikkailla [27]</i>	25
Kuva 20.	<i>Kaapelikanava [29]</i>	26
Kuva 21.	<i>Kaapeleita korotetussa lattiassa [30]</i>	27
Kuva 22.	<i>Periaatteellinen kaavio ydinvoimalaitoksen yhden divisioonan sähkönjakelusta</i>	30
Kuva 23.	<i>OL3 laitosalueen layout [8]</i>	36
Kuva 24.	<i>Esimerkki kaapelihyllyjä erottelevasta palosuojalevystä</i>	38
Kuva 25.	<i>Johtimen suojaaminen staattisella suojalla [23]</i>	40
Kuva 26.	<i>Pinta-alan pienentäminen [23]</i>	41
Kuva 27.	<i>Suojatun kierretyn parijohtimen suositellut maadoitustavat [23]</i>	42
Kuva 28.	<i>Suomalaisiin ydinvoimalaitoksiin kohdistuvien vaatimusten hierarkia</i>	45
Kuva 29.	<i>IEEE 384 mukaiset asennuskonfiguraatiot [48]</i>	60
Kuva 30.	<i>Kaapelihyllyn erottelu koteloimalla [48]</i>	61
Kuva 31.	<i>Kaapelihyllyjen erottelu suojalevyllä [48]</i>	61
Kuva 32.	<i>Päällekkäisten kaapelihyllyjen järjestys [28]</i>	67
Kuva 33.	<i>Esimerkki YVL-ohjeiden vaatimusten kirjaimellisesta noudattamisesta kaapeloinnin erottelussa</i>	77
Kuva 34.	<i>Esimerkki vaatimustenmukaisesta kaapeloinnin erottelusta (TL2 = turvallisuusluokka 2, SA = Vakavien onnettomuuksien hallinta)</i>	78

Kuva 35.	<i>Esimerkki kaapelien erottelusta vieraassa divisioonassa</i>	<i>79</i>
-----------------	----------------------------------------------------------------------	-----------

LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIEN MÄÄRITELMÄT

Lyhenteet:

AC	Alternating Current
AWG	American Wire Gauge
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
DBC	Design Basis Condition
DC	Direct Current
DEC	Design Extension Condition
DiD	Defence in Depth
DIDELSYS	Defence in Depth in Electrical Systems
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIV	Divisioona
EDG	Emergency Diesel Generator
EYT	Ei ydinteknisesti luokiteltu
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
EN	European Standard
IAEA	International Atomic Energy Agency
I&C	Instrumentation & Control
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
KTA	Kerntechnische Ausschuss
LOCA	Loss of Coolant Accident
MMI	Man-Machine Interface
N/A	Not Applicable
OL1&2	Olkiluoto 1 ja 2 -ydinvoimalaitosyksiköt
OL3	Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitosyksikkö
PRA	Probabilistic Reliability Analysis
PWR	Pressurized Water Reactor
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma
SA	Severe Accident
SAHARA	Safety As High As Reasonably Achievable
SBO	Station Blackout
SFS	Suomen Standardisoimisliitto ry
STUK	Säteilyturvakeskus
TL	Turvallisuusluokka
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UPS	Uninterruptible Power Supply
XLPE	Cross-linked Polyethylene

Merkinnät:

a	Johtimien keskipisteiden välinen etäisyys
A	Pinta-ala
B	Magneettivuontiheys

c	Valonnopeus
C	Kapasitanssi
d	Sisähalkaisija
D	Ulkohalkaisija
E	Sähkökentänvoimakkuus
f	Taajuus
F	Voima
i_s	Oikosulkuvirran huippuarvo
I	Virta
j	Imaginääriyksikkö
l	Pituus
M	Keskinäisinduktanssi
R	Resistanssi
t	Aika
U, V	Jännite
x	Etäisyys
θ	Kulma
λ	Aallonpituus
ω	Kulmanopeus
ϕ	Magneettivuo

Määritelmät:

Alkutapahtuma	Yksilöity tapahtuma, joka johtaa odotettavissa oleviin käyttöhäiriöihin tai onnettomuustilanteisiin.
Divisioona	Ydinvoimalaitoksen sisäisen sähköjakelun itsenäinen ja muista sähköjakelukanavista eroteltu osa.
Fyysinen erottelu	Järjestelmien tai komponenttien erottaminen toisistaan riittävällä esteillä, etäisyydellä tai sijoittelulla tai niiden yhdistelmillä.
Hallittu tila	Tila, jossa reaktori on sammutetussa tilassa ja jälkilämmönpoisto on turvattu.
Reaktorilaitos	Ydinvoimalaitoksen pääasiassa turvallisuusjärjestelmiä sisältävät rakennukset ja tilat, sisältää ydinreaktorin ja jälkilämmön poistoon tarvittavat järjestelmät.
Redundanssi	Ydinvoimalaitoksen tai sen järjestelmän rinnakkainen osa, joka toimii itsenäisesti ja erotellaan muista rinnakkaisista osista.
Rinnakkainen osajärjestelmä	Turvallisuusjärjestelmän (tai käyttöjärjestelmän) yksi moninkertaisuusperiaatetta toteuttava osa.
Seurausvika	Vika, joka aiheutuu jonkin toisen järjestelmän, laitteen tai rakenteen viasta tai laitoksen sisäisestä tai ulkoisesta tapahtumasta.

Sähköinen suoja	Maadoitettava metallinen kerros, joka sulkee sisäänsä kaapelin sähkökentän tai suojaa kaapelia ulkoiselta sähköiseltä vaikutukselta.
Toiminnallinen erottelu	Järjestelmien erottaminen toisistaan siten, että yhden järjestelmän toiminta tai vika ei vaikuta haitallisesti toiseen järjestelmään; toiminnallinen erottelu sisältää myös sähköisen erottelun ja järjestelmien välisen informaation käsittelyn erottelun.
Turbiinilaitos	Ydinvoimalaitoksen pääasiassa käyttöjärjestelmiä sisältävät rakennukset ja tilat, sisältää höyryturbiinin ja generaattorin sähkön tuottamiseksi.
Turvallinen tila	<i>Reaktori:</i> Tila, jossa reaktori on sammutetussa tilassa, jälkilämmön poisto on turvattu ja primääripiiri on paineeton ($T < 97\text{ °C}$). <i>Turvallisuusjärjestelmä:</i> Tila, jossa turvallisuusjärjestelmä on ydinturvallisuuden kannalta suotuisammassa tilassa.
Turvallisuusjärjestelmä	Järjestelmä joka toteuttaa toiminnallisia turvallisuustoimintoja.
Turvallisuuslohko	Fyysisesti eroteltu tila ja tilan sisältämät laitteet ja rakenteet, johon sijoitetaan turvallisuusjärjestelmän yksi moninkertaisuusperiaatetta toteuttava osa.
Ydinvoimalaitos	Sähköntuotantoon tarkoitettu voimalaitos, jossa lämpö tuotetaan fissioreaktiolla.
Yhteisvika	Kahden tai useamman rakenteen, järjestelmän tai laitteen vikaantuminen saman yksittäisen tapahtuman tai syyn vaikutuksesta.
Yksittäisvika	Yksittäinen vika, jonka seurauksena järjestelmä, laite tai rakenne ei pysty toteuttamaan sille määriteltyä toimintoa.

1. JOHDANTO

Ydinvoimalaitoksella tarvitaan käyttö- ja turvallisuusjärjestelmiä. Käyttöjärjestelmät vastaavat laitoksen normaalista käytöstä eli ydinreaktion ja höyryprosessin tehoajosta, sähkön tuottamisesta ja syöttämisestä kantaverkkoon sekä normaaleista huoltoseisokeista. Turvallisuusjärjestelmät toteuttavat turvallisuustoimintoja, jotka suojaavat laitosta, ihmisiä ja ympäristöä ydinvoimalaitoksen häiriö- ja onnettomuustilanteissa. Ydinvoimalaitoksen tärkeimmät turvallisuustoiminnot ovat reaktorin sammuttaminen ja alikriittisenä pitäminen, jälkilämmön poisto ja radioaktiivisten aineiden leviämisen estäminen. Tämä työ on tehty Säteilyturvakeskukselle (STUK), joka valvoo säteily- ja ydinturvallisuutta Suomessa. Tästä syystä tässä työssä keskitytään lähinnä turvallisuusjärjestelmiin, jotka pääasiassa vastaavat ydinvoimalaitosten turvallisuudesta.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät tarvitsevat lähes poikkeuksetta käyttövoimakseen sähköä, joka välitetään kulutuspisteeseen kaapeloinnin avulla. Joissain tapauksissa itse käyttövoima voidaan saada esimerkiksi painovoimasta tai dieselmoottorin akselilta, mutta näissäkin tapauksissa tarvitaan usein akustovarmennettua ohjaussähköä tukijärjestelmiin tai käyttötoimiin. Sähkönsyötön lisäksi kaapelointi osallistuu turvallisuusjärjestelmien tiedonsiirtoon. Ydinreaktion ja höyryprosessin käyttäytymistä valvotaan lukuisten eri parametrien avulla, joiden tilatieto siirretään kaapeloinnin avulla laajan automaation ja käyttöhenkilöstön käytettäväksi. Turvallisuusjärjestelmien tiedonsiirrossa ei sallita langatonta tiedonsiirtoa. Sähkönsyöttöön ja tiedonsiirtoon osallistuvalla kaapeloinnilla on siten merkittävä vaikutus lähes kaikkiin ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmiin.

Turvallisuusjärjestelmät suunnitellaan useaksi toisiaan korvaavaksi rinnakkaiseksi osajärjestelmäksi, jotka ovat toiminnaltaan mahdollisimman itsenäisiä. Rinnakkaiset osajärjestelmät erotetaan toisistaan luotettavasti, jotta viat tai muut vaarantavat tapahtumat, kuten tulipalot, eivät pääsisi etenemään osajärjestelmästä toiseen. Tällä pyritään varmistamaan turvallisuusjärjestelmän turvallisuustoimintojen luotettava toteutuminen kaikissa tilanteissa.

Mahdollisuutta, että yhden tai useamman kokonaisen turvallisuusjärjestelmän toiminta menetettäisiin, ei voi kuitenkaan sulkea täysin pois. Tästä syystä ydinvoimalaitoksen turvallisuus perustuu syvyyssuuntaiseen puolustusperiaatteeseen, jonka mukaisesti viikaantuneiden turvallisuusjärjestelmien turvallisuustoiminnot tulee pystyä korvaamaan muilla, edellisistä riippumattomilla järjestelmillä. Tällä tavoin turvallisuusjärjestelmät ja turvallisuustoiminnot muodostavat useita peräkkäisiä toisiaan korvaavia tasoja eli syvyyssuuntaisia puolustustasoja. Tasojen tulee olla niin riippumattomia toisistaan kuin

käytännöllisin toimenpitein on saavutettavissa, jotta usean tason menettäminen samasta syystä estetään.

Edellä esitetyt rinnakkaisperiaate ja syvyysuuntainen puolustusperiaate pitää sisällyttää myös tukijärjestelmänä toimivaan kaapelointiin, koska kaapeloinnin luotettavuus määrittää suurelta osin myös varsinaisen turvallisuustoiminnon toteutumisen luotettavuutta. Toisin sanoen kaapeloinnin luotettavuus ei saa muodostaa merkittävää uhkaa turvallisuustoimintojen toteutumiselle. Muita huomioitavia asioita kaapeloinnin erottelussa ovat lisäksi sähkömagneettiset häiriöt ja turvallisuusluokkien erottelu.

Luotettavan sähkönsyötön ja tiedonsiirron varmistamiseksi ja turvallisuusjärjestelmien turvallisuustoimintojen toteutumiseksi kaapeloinnissa tulee siis:

1. Erottaa turvallisuusjärjestelmien rinnakkaiset osajärjestelmät.
2. Varmistaa riittävä syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuus.
3. Estää sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen.
4. Estää riittävän luotettavasti alemman turvallisuusluokan laitteen tai kaapelin toimintatavan tai vikaantumisen aiheuttama ylemmän turvallisuusluokan laitteen tai kaapelin vikaantuminen tai toiminnan menetys.

Kyseiset toimenpiteet tehdään käytännössä kaapeloinnin fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla. Fyysinen erottelu toteutetaan etäisyydellä, esteillä tai näiden yhdistelmillä. Fyysinen erottelu voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisten osajärjestelmien kaapelointien erottamista palosuojana toimivalla levyllä. Toiminnallinen erottelu tai kaapeloinnin tapauksessa toisin sanoen sähköinen eristäminen tehdään etäisyydellä, erotuslaitteilla, suojilla, kaapelointitekniikoilla tai näiden yhdistelmillä. Toiminnallista erottelua on käytännössä esimerkiksi voimakaapelin ja instrumentointikaapelin asentaminen riittävän etäälle toisistaan. Tällöin yleisen sähkö- ja magneettikenttiä koskevan kenttäteorian mukaan, voimakaapelin sähkö- ja magneettikenttien vaikutukset instrumentointikaapeliin heikkenevät koska sähkökentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys ovat kääntäen verrannollisia etäisyyteen. Toiminnalliseen erotteluun lukeutuu myös sähköjärjestelmien selektiivinen suojaus.

Erottelun toteuttamista käytännössä hankaloittaa ydinvoimalaitoksen tilarajoitukset. Vaikka kaapelointi on oleellinen osa ydinvoimalaitoksen yleistä layout-suunnittelua, on kaapeloinnin toteuttaminen ja sijoittelu silti haasteellista. Laitoksen muut järjestelmät ja laitteet vaativat itselleen merkittävästi tilaa, jolloin kaapeloinnin optimaalinen sijoittelu hankaloituu. Tästä syystä kaapeloinnissa joudutaan usein tekemään erilaisia vaihtoehtoisia ratkaisuja, joiden turvallisuus tulee analysoida tapauskohtaisesti.

Se, millä tavalla neljä edellä esitettyä periaatetta pitää kaapeloinnissa toteuttaa, määrätään erilaisissa kansallisissa ja kansainvälisissä vaatimuksissa. Suomalaisia ydinvoimalaitoksia koskevat tärkeimmät vaatimukset esitetään Ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet). YVL-ohjeiden vaatimuksia tarkentavat edelleen kansalliset tai kansainväliset

ydintekniset tai teollisen alan standardit. Kaapeloinnin erottelun tapauksessa puhutaan käytännössä muun muassa IEEE:n ja IEC:n ydinteknisistä standardeista. Tämän työn tilaajan, eli STUKin, tehtävänä on valvoa, että kaapeloinnin erottelu toteuttaa riittävällä tavalla sille asetetut vaatimukset, jotta ydinenergiain mukainen turvallisuustaso täyttyy. Työn tarkoituksena on auttaa STUKin työtä tulevien ydinvoimalaitosten kaapelointiratkaisujen viranomaisvalvontatyössä.

Tämän työn päätavoite on tutustua kaapeloinnin erottelua koskeviin vaatimuksiin, tunnistaa olennaisimmat vaatimukset ja pohtia perusteita vaatimusten täyttämiseksi käytännössä. YVL-ohjeiden vaatimukset ja niiden mukaan noudatetut standardit kohdistavat kaapeloinnin erottelulle lukuisia viranomaisvaatimuksia. Vaatimusten tulkitseminen ja toteuttaminen käytännössä on vaikeaa, koska kansallisissa YVL-ohjeissa on vain vähän varsinaisesti kaapeloinnin erottelua koskevia vaatimuksia. Erotteluvaatimukset tuleekin käytännössä johtaa YVL-ohjeiden syvyys-suuntaista puolustusta ja sähkö- ja automaatiojärjestelmiä koskevista laitos- ja järjestelmätason vaatimuksista. Kun huomioidaan lisäksi kaapeloinnin varsin passiivinen tekninen luonne (kaapeloinnin vikaantuminen ja esimerkiksi itsesytyminen on hyvin epätodennäköistä), on vaatimusten tulkitseminen kaapeloinnin erotteluun haasteellista. Vaatimusten tulkinnalle tulisi löytää myös tekniset perusteet. Standardit taas käsittelevät kaapeloinnin erottelua varsin selkeästi, mutta usein niiden vaatimustaso ja lähtökohdat eroavat YVL-ohjeista ja suomalaisista käytännöistä, mikä jälleen hankaloittaa vaatimusten tulkitsemista ja yhdistämistä YVL-ohjeiden vaatimuksiin. YVL-ohjeiden ja standardien vaatimukset ovat sekä päällekkäisiä että osittain eroavaisia, minkä takia kaapeloinnin erotteluratkaisu tulee käsitellä aina tapauskohtaisesti. Riittävä ydinturvallisuuden taso voidaan periaatteessa saavuttaa usealla eri tavalla.

Aluksi työssä käydään läpi kaapeloinnin erotteluun liittyvät tekniset asiat. Näitä ovat ydinvoimalaitoksen yleiset suunnitteluperiaatteet, kaapeloinnin tekniikka, ydinvoimalaitoksen tyypilliset kaapelijärjestelmät sekä niiden suojaus erilaisia sisäisiä ja ulkoisia uhkia vastaan. Tämän jälkeen käydään läpi olennaiset vaatimukset koskien kaapeloinnin erottelua suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla. Lopuksi esitellään työssä olennaisiksi tunnistetut vaatimukset ja pohditaan perusteita vaatimusten toteuttamiseksi. Työn sisältö on rajattu koskemaan lähinnä tulevia suomalaisia ydinvoimalaitoksia. Työhön liittyen tehtiin myös työraportti [1], jossa käsiteltiin käyvien ja rakenteilla olevien suomalaisten ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erotteluratkaisuja.

2. YDINVOIMALAITOKSEN SUUNNITTELUPERIAATTEET

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus on pidettävä niin korkealla tasolla, kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Kansainvälisesti puhutaan SAHARA-periaatteesta (*Safety As High As Reasonably Achievable*). Suomalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuusvaatimukset on esitetty YVL-ohjeissa. YVL-ohjeiden mukaan korkea turvallisuustaso saavutetaan luotettavilla turvallisuustoiminnoilla ja radioaktiivisten aineiden vapautumista rajoittavilla moninkertaisilla peräkkäisillä rakenteellisilla esteillä. Korkean turvallisuustason tarkoituksena on suojella ihmisiä ja ympäristöä ydinvoimalaitosten radioaktiivisten aineiden haitallisilta vaikutuksilta. [2-4]

Vaikka ydinvoimalaitosten suunnittelussa ja toteutuksessa noudatetaan korkeaa vaatimustasoa aina suunnitteluorganisaation laadunhallinnasta yksittäisen laitteen tekniseen suunnittelemiseen käyttötarkoitukseensa, ei häiriöiden, vikojen tai inhimillisten virheiden mahdollisuutta pystytä täysin estämään. Tästä syystä ydinvoimalaitoksen suunnittelussa on aina varauduttava käyttöhäiriöihin ja häiriöiden laajenemisesta seuraaviin onnettomuuksiin. Pahimmassa tapauksessa onnettomuudet voivat johtaa reaktorisydämen sulamiseen, jonka mahdollisuutta ei myöskään voi sulkea täysin pois. Onnettomuuksien todennäköisyyden tulee olla sitä pienempi, mitä vakavammat seuraukset sillä saattaisi olla.

Suunnittelussa täytyy huomioida tapahtumat, jotka saavat aikaan laitoksen parametrien poikkeamisen normaaliarvoistaan, sekä tapahtumat, jotka voivat vaarantaa turvallisuustoimintoja toteuttavien laitteiden tai järjestelmien toimimisen. Nämä tapahtumat voivat saada alkunsa esimerkiksi suurimman jäähdytysputken äkillisestä katkeamisesta, laiteviasta, laitoksen toiminnan tai automaattisen ohjauksen virheestä sekä sisäisistä ja ulkoisista uhista. Sisäisiä uhkia ovat esimerkiksi tulipalot laitoksen sisällä, vetyräjähdys sekä ilkivalta. Ulkoisia uhkia voivat olla muun muassa maanjäristys, lentokonetörmäys sekä merivesiyhteyden tukkeutuminen. Myös inhimillisten virheiden välttämiseen, havaitsemiseen ja korjaamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. [3]

Ydinvoimalaitoksen onnettomuuksia estävät ja lieventävät turvallisuustoiminnot. Ydinvoimalaitoksen tärkeimmät turvallisuustoiminnot ovat:

- Reaktorin pysäyttäminen ja alikriittisenä pitäminen
- Reaktorin jälkilämmön poistaminen
- Radioaktiivisten aineiden leviämisen estäminen

Turvallisuustoimintoja suorittavat turvallisuusjärjestelmät. Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa on sovellettava moninkertaisuus-, erottelu- ja erilaisuusperiaatteita. Näin varmistetaan turvallisuustoimintojen toteutuminen myös vikaantumistilanteissa. [3; 5]

Ensisijaisesti turvallisuustoiminnon toteuttamisessa on käytettävä luontaisia turvallisuusominaisuuksia. Ydinreaktori on esimerkiksi suunniteltava siten, että sen fysikaalisten takaisinkytkentöjen yhteisvaikutus hillitsee reaktorin tehon kasvua. Jos luontaisia turvallisuusominaisuuksia ei voida käyttää hyväksi, on ensisijaisesti käytettävä laitteita, jotka eivät tarvitse ulkoista käyttövoimaa, kuten sähköä, tai jotka käyttövoiman menetyksen seurauksena asettuvat turvalliseen tilaan. Hyvin usein päädytään kuitenkin käyttämään ratkaisuja, jotka ovat hyvin riippuvaisia sähköstä ja tätä kautta myös kaapeloinnista. [3; 6]

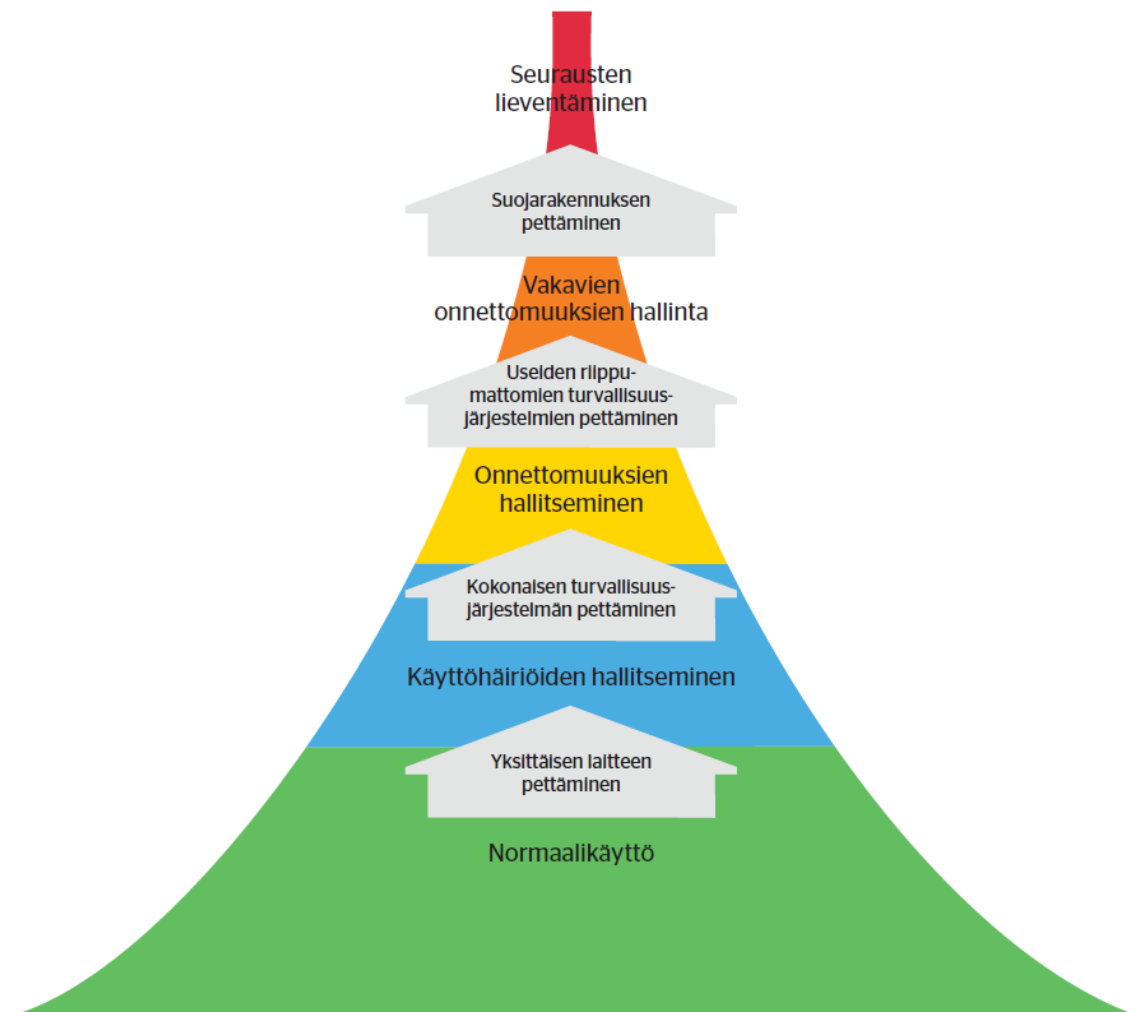
2.1 Syvyysuuntainen puolustus

Ydinvoimalaitoksen turvallisuuden on perustuttava syvyysuuntaiseen puolustusperiaatteen (*Defence in Depth*). Ydinvoimalaitoksen syvyysuuntainen puolustus rakentuu useista peräkkäisistä toisiaan varmentavista tasoista, joiden täytyy olla niin riippumattomia toisistaan kuin käytännöllisin toimenpitein on saavutettavissa. Yhden puolustustason menetys ei saa heikentää muiden puolustustasojen toimintaa. Syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuus varmistetaan toiminnallisella ja fyysisellä erotteulla sekä erilaisuusperiaatteen soveltamisella. Syvyysuuntainen puolustus kattaa ydinvoimalaitoksen sekä toiminnallisen että rakenteellisen turvallisuuden kaikessa ydinvoimalaitokseen liittyvässä toiminnassa koko elinkaaren ajan. [2; 3; 6]

Ydinvoimalaitoksen toiminnallista syvyysuuntaista puolustusta toteuttavat turvallisuustoiminnot perustuvat viiteen peräkkäiseen tasoon, joita on havainnollistettu taulukossa 1 ja kuvassa 1. Kaksi ensimmäistä tasoa ehkäisevät onnettomuuksia ja loput suojaavat ihmisiä, laitosta sekä ympäristöä onnettomuuksien haitallisilta vaikutuksilta. Kahden ensimmäisen tason tulisi estää käyttöhäiriöiden ja vikojen laajentuminen onnettomuudeksi, niin hyvin kuin käytännöllisin toimenpitein on saavutettavissa. Mikään yksittäisen laitteen vikaantuminen tai virhetoiminto laitoksen normaalissa käytössä ei saa johtaa onnettomuuksien hallintaan suunniteltujen järjestelmien käyttöön. [3; 4]

Taulukko 1. Syvyysuuntaisen puolustuksen tasot

Taso	Tehtävä	Sallitut tapahtumat / vuosi
1	Ennalta ehkäiseminen: varmistetaan laitoksen häiriötön käyttö noudattamalla korkeita laatu- ja luotettavuusvaatimuksia sekä käyttämällä riittäviä varmuusmarginaaleja.	-
2	Häiriötilanteiden hallinta: varaudutaan poikkeamiin normaaleista käyttötilanteista järjestelmillä, jotka havaitsevat häiriöt ja estävät häiriötilanteiden kehittymistä onnettomuuksiksi.	$\frac{1}{100}$
3	Onnettomuuksien hallinta: varaudutaan onnettomuuksiin luotettavilla järjestelmillä, jotka käynnistyvät automaattisesti suojaten radioaktiivisten aineiden leviämistä pidättäviä esteitä sekä estävät vakavien onnettomuuksien syntymisen.	$\frac{1}{100} < f < \frac{1}{1000}$
4	Vakavien onnettomuuksien hallinta: minimoidaan vakavien onnettomuuksien seurauksia varmistamalla suojarakennuksen eheys ja tiiviys.	$< \frac{1}{10000}$
5	Seurausten lieventäminen: rajoitetaan radioaktiivisten päästöjen vaikutuksia valmius- ja pelastusjärjestelyillä.	$< \frac{1}{100000}$

**Kuva 1.** Syvyysuuntaisen puolustuksen tasot [7]

Toiminnallisten turvallisuustoimintojen ensisijainen tehtävä on säilyttää radioaktiivisten aineiden vapautumista estävien fyysisten esteiden eheys. Turvallisuustoiminnot voivat olla aktiivisia, passiivisia tai luontaisia. Tarvittavien fyysisten esteiden lukumäärä riippuu radioaktiivisten aineiden määrästä ja ominaisuuksista, yksittäisten esteiden tehokkuudesta, mahdollisista sisäisistä ja ulkoisista uhista sekä vikojen tai muun epäonnistumisen potentiaalisista seurauksista. Kuvassa 2 on esitetty tyypilliset fyysiset esteet, joita ovat polttoaine, reaktoripaineastia ja siihen kytkeytyvä primääripiiri sekä suojarakennus. [4]



Kuva 2. Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden vapautumista estävät fyysiset esteet [8]

2.2 Suunnitteluperusteluokat

Ydinvoimalaitoksen eri käyttö- ja onnettomuustilanteet jaetaan suunnitteluperusteluokkiin. Suunnitteluperusteluokat on esitetty kootusti taulukossa 2. Normaalikäytössä (DBC1) laitoksen parametrit ovat normaalien rajojen sisällä. Odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä (DBC2) laitoksen parametrit poikkeavat hieman normaalista mutta ovat edelleen sallituissa rajoissa. Tilanne pyritään palauttamaan rajoitustoiminnoilla takaisin normaalikäyttöön. Suunnittelun perustana olevissa onnettomuuksissa (DBC3 ja 4) laitoksen parametrit eivät pysy enää sallituissa rajoissa, jolloin vaadittavat turvallisuustoiminnot käynnistyvät. Onnettomuuksien laajennuksissa (DEC) varaudutaan pääpuolustuslinjan (keltaisella väritetty) pettämiseen erityisesti erilaisuusperiaatetta noudattavilla ratkaisuilla. Pieniä polttoaine vaurioita voi myös ilmetä. Vakavissa onnettomuuksissa (SA) polttoaine alkaa merkittävästi vaurioitumaan. [9]

Taulukko 2. Suunnitteluperusteluokat

DiD-taso	Suunnittelu-perusteluokka		Selite	
1	DBC1		Normaalikäyttö	
2	DBC2		Odotettavissa olevat käyttöhäiriöt	
3	A	DBC3	Suunnittelun perustana olevat onnettomuudet, luokka 1	
		DBC4	Suunnittelun perustana olevat onnettomuudet, luokka 2	
	B	DEC	Suunnittelun perustana olevien onnettomuuksien laajennukset	DEC A Yhteisvika
				DEC B Monimutkaiset vikayhdistelmät
				DEC C Harvinaiset ulkoiset tapahtumat
4	SA		Vakavat onnettomuudet	

2.3 Turvallisuusluokat

Ydinvoimalaitoksen sähkö- ja automaatiojärjestelmät ja niiden kaapelit ryhmitellään (toiminnallisiin) turvallisuusluokkiin 2, 3 ja EYT (ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu). Turvallisuusluokka määräytyy järjestelmän merkityksestä turvallisuustoimintojen luotettavuudelle. Esimerkiksi sähköjärjestelmissä vaativimpaan turvallisuusluokkaan 2 kuuluvat hätädieselgeneraattorit (EDG), jotka turvaavat jälkilämmön poiston laitoksen hallittuun tilaan saattamiseksi. Sähkö- ja automaatiojärjestelmiä koskevien turvallisuusluokkien pääpiirteet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Järjestelmien turvallisuusluokkien pääpiirteet

TL	Selite
2	Järjestelmät, joilla laitos saadaan hallittuun tilaan (DBC3 ja 4)
3	<ul style="list-style-type: none"> - Järjestelmät, joiden vika käynnistää turvallisuustoiminnon (DBC1) - Rajoitusjärjestelmät (DBC2) - Järjestelmät, joilla laitos saadaan hallitusta tilasta turvalliseen tilaan (DBC3 ja 4) - Keskeinen onnettomuusinstrumentointi (DBC3 ja 4) - Erilaisuusperiaatteen järjestelmät hallittuun tilaan siirtymiseksi (DEC) - Vakavien onnettomuuksien hallinta (SA)
EYT	Kaikki muut järjestelmät, jotka eivät kuulu turvallisuusluokkiin 2 tai 3.

Järjestelmä ja kaapeli ryhmitellään aina vaativimpaan luokkaan, jota kohdetta koskevat perusteet edellyttävät. Turvallisuusluokkien väliseksi rajaksi määritellyt laitteet, kuten sulakkeet ja katkaisijat, kuuluvat ylempään turvallisuusluokkaan. [10]

2.4 Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperiaatteet

Turvallisuusjärjestelmät vastaavat ydinvoimalaitoksen turvallisuustoimintojen toteuttamisesta. Säteilyturvakeskuksen määräyksen (STUK Y/1/2016) [6] 11 § mukaan:

*”Onnettomuuksien estämiseksi ja niiden seurausten lieventämiseksi ydinvoimalaitoksessa on oltava järjestelmät reaktorin pysäyttämiseen ja alikriittisenä pitämiseen, reaktorissa syntyvän jälkilämmön poistamiseen sekä radioaktiivisten aineiden pidättämiseen laitoksen sisällä. Kyseisten järjestelmien suunnittelussa on sovellettava **moninkertaisuus-, erottelu- ja erilaisuusperiaatteita**, joilla varmistetaan turvallisuustoiminnon toteutuminen myös vikaantumistilanteissa.”*

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmien tärkeimmät suunnitteluperiaatteet.

2.4.1 Vikakriteerit

Turvallisuusjärjestelmän on täytettävä N+2 tai N+1 –vikakriteeri riippuen järjestelmältä vaaditusta luotettavuudesta. Vikakriteeri kuvaa turvallisuusjärjestelmän vikasietoisuutta. Vikakriteerissä N kuvaa tarvittavien turvallisuusjärjestelmän rinnakkaisten osajärjestelmien lukumäärää riittävien turvallisuustoimintojen toteuttamiseksi. Lisättävä numero kuvaa rinnakkaisten osajärjestelmien lukumäärää, jotka voidaan menettää ilman turvallisuustoimintojen vaarantumista. Jos rinnakkainen osajärjestelmä vikaantuu ja vikakriteeri alenee (esim. N+2 \rightarrow N+1), täytyy aloittaa laitoksen turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE) määrätyt toimenpiteet tilanteen korjaamiseksi ja vikakriteerin palauttamiseksi ennalleen.

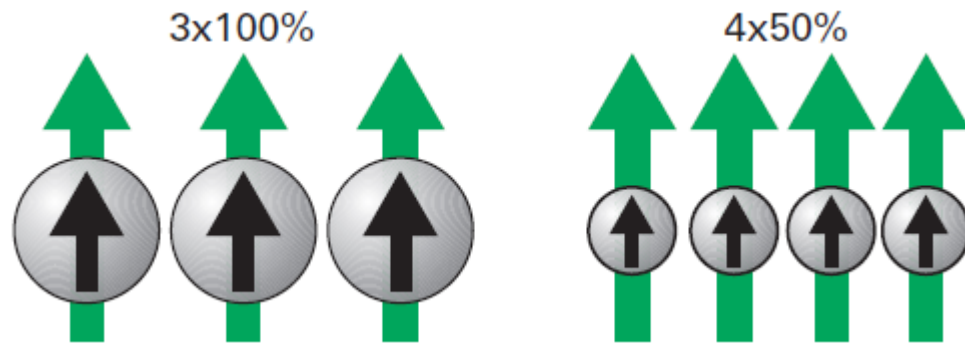
N+2 –vikakriteeri täyttyy, kun turvallisuusjärjestelmä pystyy suorittamaan turvallisuustoimintonsa, vaikka mikä tahansa järjestelmän yksittäinen komponentti vikaantuu ja yhtäaikaaisesti mikä tahansa toinen komponentti on poissa käytöstä korjauksen tai huollon takia. N+2 –vikakriteerin täyttämistä vaaditaan turvallisuusluokan 2 järjestelmiltä, joilla laitos saadaan hallittuun tilaan.

N+1 –vikakriteeri eli yksittäisvikakriteeri täyttyy, kun turvallisuusjärjestelmä pystyy suorittamaan turvallisuustoimintonsa, vaikka mikä tahansa järjestelmän yksittäinen komponentti vikaantuu. N+1 –vikakriteeriä vaaditaan lyhyesti sanottuna kaikilta muilta turvallisuusjärjestelmiltä, joilta ei vaadita N+2 –vikakriteerin täyttämistä. Turvallisuusjärjestelmän vikakriteerin määräytymistä havainnollistaa lisää kappaleen 2.4.6 kuva 6. [3]

2.4.2 Rinnakkaisperiaate (*redundancy*)

Moninkertaisuusperiaatetta eli toiselta nimeltään rinnakkaisperiaatetta noudattavat turvallisuusjärjestelmät jaetaan useiksi toisiaan korvaaviksi osajärjestelmiksi. Käyttämällä useampaa osajärjestelmää, voidaan sallia yhden tai useamman osajärjestelmän vikaantuminen ilman, että turvallisuustoimintojen toteutuminen vaarantuu. Kuvassa 3 on esitetty kaksi erilaista tapaa toteuttaa rinnakkaisperiaatetta siten, että N+2 –vikakriteeri

toteutuu. Kuvassa vasemmalla on niin sanottu kolmiredundanttinen (3x100%) malli ja oikealla neliredundanttinen (4x50%).



Kuva 3. $N+2$ –vikakriteerin toteuttavat rinnakkaiset pumput [5]

Redundanssi kuvaa järjestelmän yhtä osajärjestelmää, joka on eroteltu muista saman järjestelmän osajärjestelmistä. Kuvan 3 mukaisessa kolmiredundantisessa 3x100% -järjestelmässä yksi kolmesta osajärjestelmästä riittää turvallisuustoimintojen suorittamiseen, kun taas neliredundantisessa 4x50% -järjestelmässä tarvitaan kaksi neljästä osajärjestelmästä. Rinnakkaisia osajärjestelmiä voidaan vain perustellussa tapauksessa kytkeä toisiinsa, jos tämä parantaa kokonaisjärjestelmän luotettavuutta. [5]

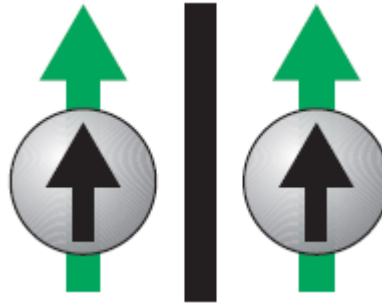
YVL-ohjeet velvoittavat suunnittelemaan suomalaisten ydinvoimalaitosten tärkeimmät turvallisuusjärjestelmät vähintään kolmiredundantisiksi, jotta $N+2$ –vikakriteeri toteutuisi. Rakenteilla oleva OL3 tulee olemaan neliredundanttinen.

Redundanssien määrän kasvattaminen lisää aluksi merkittävästi turvallisuusjärjestelmien luotettavuutta ja käytettävyyttä, mutta saatu hyöty alkaa myös nopeasti saturoitumaan. Rinnakkaisuus ei suojaa järjestelmiä juurikaan yhteisvikojen vaikutuksilta. Yhteisvialla tarkoitetaan usean järjestelmän, laitteen tai rakenteen vikaantumista saman yksittäisen tapahtuman tai syyn seurauksena joko samanaikaisesti tai lyhyen ajan sisällä. Esimerkiksi ydinvoimalaitoksen omakäytösähköverkossa esiintyvä ylijännite voi yhtäaikaaisesti vaurioittaa osaa tai jopa kaikkia rinnakkaisia lähes identtisiä sähkönsäätökanavia [11].

2.4.3 Erotteluperiaate (*separation*)

Erotteluperiaatteella käsitetään turvallisuusjärjestelmien fyysinen ja toiminnallinen erottelu. Erottelua voidaan suorittaa saman turvallisuusjärjestelmän eri osajärjestelmien välillä sekä muista rakenteista, järjestelmistä ja laitteista mukaan lukien kaapelit.

Fyysinen erottelu voidaan toteuttaa etäisyyden ja/tai fyysisten esteiden avulla. Kuvassa 4 on havainnollistettu kahden pumpun fyysistä erottamista esteen avulla. Tilan salliessa on erottelu yleensä helpompaa toteuttaa etäisyydellä. Fyysisen erottelun tarkoituksena on suojata järjestelmiä sisäisiltä ja ulkoisilta uhilta kuten tulipaloilta.

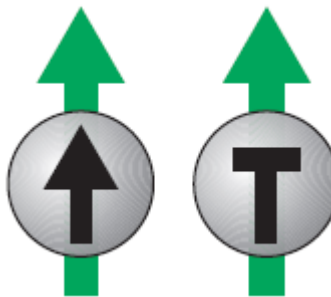


Kuva 4. *Fyysisellä esteellä erotellut pumput [5]*

Toiminnallisella erottelulla estetään rinnakkaisten tai toisiinsa liittyvien järjestelmien keskinäinen vuorovaikutus sekä vuorovaikutus ympäristön kanssa. Toiminnallinen erotelu voi tarkoittaa esimerkiksi herkkien automaatiokaapelien ympäröimistä metallisella suojalla, jonka tarkoituksena on suojata kaapeleita sähkömagneettisilta häiriöiltä. Sama suojausvaikutus voitaisiin saada myös erottelemalla kaapelit riittävällä etäisyydellä häiriölähteestä. [4]

2.4.4 Erilaisuusperiaate (*diversity*)

Erilaisuusperiaatetta noudattavassa turvallisuusjärjestelmässä on rinnakkaisia eri toimintaperiaatteella toimivia tai esimerkiksi eri valmistajien järjestelmiä tai laitteita. Ensimmäisessä tulisi pyrkiä käyttämään eri toimintaperiaatteeseen pohjautuvia ratkaisuja mutta aina tämä ei ole teknisesti mahdollista tai mielekästä. Kuvassa 5 on esitetty erilaisuusperiaatetta toteuttavat keskipako- ja mäntäpumppu. Erilaisuusperiaatteen noudattamisella on merkittävä vaikutus yhteisvikojen torjumisessa. Jos jostain syystä toinen pumpuista vikaantuu, on epätodennäköisempää, että myös toinen vikaantuu samanaikaisesti, kuin tapauksessa, jossa pumput toimisivat samalla toimintaperiaatteella. Järjestelmien liiallinen erilaisuus voi toisaalta lisätä monimutkaisuutta. [5]



Kuva 5. *Erilaisuusperiaatetta toteuttavat keskipako- ja mäntäpumppu [5]*

2.4.5 Turvallisen tilan periaate

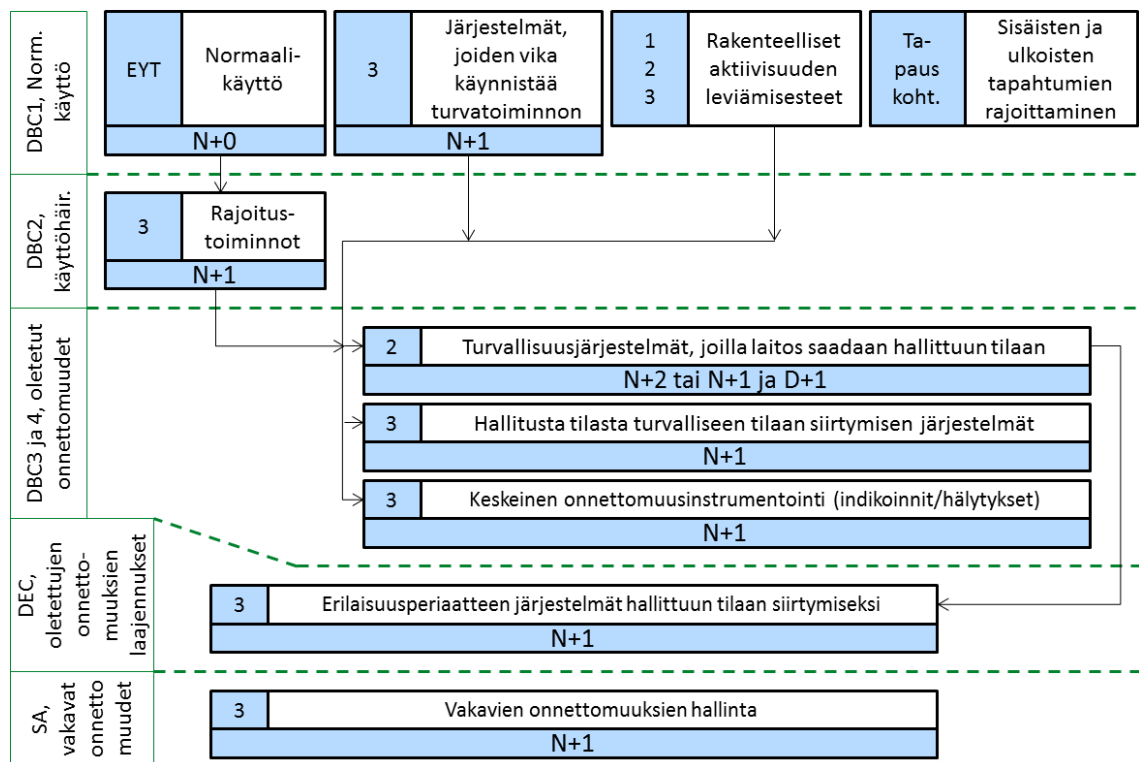
Turvallinen tila tarkoittaa turvallisuusjärjestelmien yhteydessä sitä, että laite tai järjestelmä joutuu laitoksen turvallisuuden kannalta mahdollisimman edulliseen tilaan, jos se menettää käyttövoimansa, kuten sähkönsyöttönsä. Esimerkiksi painevesireaktorin

(PWR) säätösauvoja ohjataan tästä syystä sähkömagneeteilla. Jos säätösauvajärjestelmä menettää sähkönsyöttönsä, loppuu samalla myös sähkömagneettien magneettisuus ja säätösauvat putoavat painovoiman vaikutuksesta reaktoriin. Tapahtuu siis reaktorin pikasulku, joka kyseisessä tilanteessa on ydinturvallisuuden kannalta edullisin tila. [5]

2.4.6 Yhteenveto

Turvallisuusjärjestelmät suunnitellaan luotettaviksi ja hyvän käytettävyyden takaamiseksi noudattaen kolmea perusperiaatetta, jotka ovat rinnakkais-, erottelu- ja erilaisuusperiaate. **Rinnakkaisperiaate** takaa turvallisuusjärjestelmien turvallisuustoimintojen toteutumisen yksittäisvikojen sekä huoltojen ja korjausten aikana. **Erotteluperiaate** suojelee turvallisuusjärjestelmiä ydinvoimalaitoksen sisäisiltä ja ulkoisilta uhkilta. **Eri-laisuusperiaate** estää tehokkaasti yhteisvikojen syntymisen saman turvallisuusjärjestelmän eri osajärjestelmiin.

Turvallisuusjärjestelmien turvallisuusluokittelu ja vaaditut vikakriteerit on esitetty suunnitteluperusteluokkien kanssa kuvassa 6. Kuva havainnollistaa turvallisuusjärjestelmille asetettua vaatimustasoa eri suunnitteluperusteluokissa.



Kuva 6. Turvallisuusjärjestelmien turvallisuusluokan ja vikakriteerin määräytymisen suunnitteluperusteluokittain [12]

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa täytyy lisäksi noudattaa korkeaa laatutasoa ja hyödyntää käytännössä koeteltua ja hyväksi todettua tekniikkaa sekä noudattaa soveltuvia ydin- tai muun teollisuuden alan ja laadunhallinnan standardeja.

Myös ikääntyminen on otettava huomioon ja turvallisuusjärjestelmien toiminta ja turvallisuustoimintojen toteutuminen on kyettävä todentamaan säännöllisin väliajoin. Lisäksi inhimillisten virheiden mahdollisuus tulee huomioida. [2]

2.5 Turvallisuuden arviointi

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus ja turvallisuusjärjestelmien suunnittelun vaatimustenmukaisuus täytyy todentaa deterministisillä eli tapahtumapohjaisilla analyyseillä, joita täydentävät todennäköisyysperusteiset riskianalyysit. Analyysien on katettava odotettavissa olevat käyttöhäiriöt ja onnettomuudet, jotka määräävät tai rajoittavat turvallisuusjärjestelmien mitoitusta. [9]

2.5.1 Deterministiset analyysit

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelu perustellaan deterministisin turvallisuusanalyysin. Deterministinen turvallisuusanalyysi tehdään alkutapahtumille, joiden jälkeen turvallisuusjärjestelmää tarvitaan. Alkutapahtumat ovat yksilöityjä tapahtumia, jotka johtavat odotettavissa oleviin käyttöhäiriöihin tai onnettomuustilanteisiin. Alkutapahtuman todennäköisyydellä ei ole väliä, vaan se oletetaan tapahtuvaksi, jonka jälkeen analyysin tulee osoittaa, että riittävät turvallisuustoiminnot toteutuvat. Tilanteet on analysoitava alkutapahtumasta reaktorin turvalliseen tilaan asti. [3; 9]

2.5.2 Todennäköisyysperusteiset analyysit

Todennäköisyysperusteiset riskianalyysit (PRA) perustuvat tilastollisiin ja todennäköisyyspohjaisiin menetelmiin. PRA:ssa tarkastellaan kaikkien turvallisuudelle tärkeiden laitteiden, järjestelmien, toimintojen ja ihmisen toimien luotettavuutta. PRA:ssa on arvioitava reaktorisydämen vakavan vaurion todennäköisyyttä, suuren radioaktiivisten aineiden päästön todennäköisyyttä, suunnittelun tasapainoisuutta sekä yksittäisten rakenteiden, järjestelmien ja laitteiden riskimerkitystä. PRA tukee perinteisiä determinististä turvallisuusajattelua ja antaa kuvaa laitoksen tärkeimmistä riskitekijöistä, mikä auttaa laitoksen suunnittelussa sekä käyttötoiminnan ja teknisten ratkaisujen kehittämisessä. [3; 5]

3. KAAPELOINNIN TEKNIikka

Kaapelointi on perinteistä ja erittäin koeteltua tekniikkaa lukuisilta teollisuuden aloilta. Vaikka kaapeloinnin tehtävänä on yksinkertaisesti kuljettaa sähköä tai informaatiota paikasta toiseen, liittyy siihen kuitenkin myös paljon erilaista tekniikkaa, joka pitää ymmärtää kaapelointiratkaisuja valittaessa. Kaapeloinnin perustana toimivat sähkötekniset ilmiöt, jotka määrittävät kaapeleilta vaaditut ominaisuudet ja asennustekniikat toimivan ja luotettavan sähkön- ja tiedonsiirron takaamiseksi.

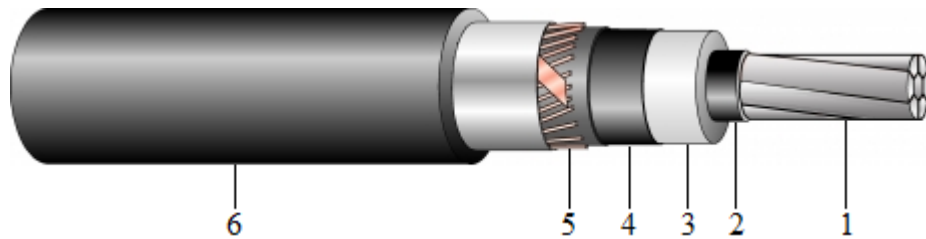
Tässä luvussa esitellään aluksi erilaiset kaapelityypit ja niiden rakenteet. Tämän jälkeen käydään läpi kaapeloinnissa pääasiassa huomioonotettavat sähkötekniset ilmiöt ja ydinvoimalaitoksissa tyypillisesti käytetyt asennustavat.

3.1 Kaapelityypit ja kaapelien rakenne

Ydinvoimalaitosten kaapeleita jaotellaan eri kaapelityyppeihin ja –luokkiin aina laitoksen ja yksikkökohtaisesti riippuen eri käyttökohteista. Kaapeleita voidaan jaotella yleisesti ainakin jännitetason, rakenteen, käyttötarkoituksen ja kaapelin muodostaman yhteyden (galvaaninen tai optinen) mukaan. Seuraavana on pyritty esittelemään suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla tyypillisesti käytetyt erilaiset kaapelityypit ja niiden rakenteet, jaotellen kaapelit käyttötarkoituksensa mukaan.

3.1.1 Voimakaapelit

Voimakaapelien tehtävänä on kuljettaa sähköenergiaa (”vahvavirtaa”) teholähteeltä sähkökuormalle. Voimakaapelit jaetaan ydinvoimalaitoksilla yleensä keski- ja pienjännitekaapeleihin. Keskijännitekaapeleiden nimellinen jännite on > 1 kV ja pienjännitekaapeleiden ≤ 1 kV. Ydinvoimalaitoksen keskijännitekaapeleista saatetaan puhua myös suurjännitekaapeleina, mutta suomalaisen käytännön (SFS) mukaan ne lukeutuvat yleensä keskijännitteeseen. Voimakaapelit voivat olla yksijohdin- tai monijohdinkaapeleita. Kolmivaihejärjestelmässä yksijohdinkaapeli sisältää yhden kolmesta vaiheesta. Monijohdinkaapelit sisältävät vähintään kaikki kolme vaihetta sekä mahdollisen suoja-johtimen. Tyypillinen keskijännitteisen yksijohdinkaapelin rakenne on esitetty kuvassa 7. Voimakaapelin rakenneosat on numeroitu kuvassa yhdestä kuuteen.



Kuva 7. AHXCMK-yksijohdinkaapeli [13]

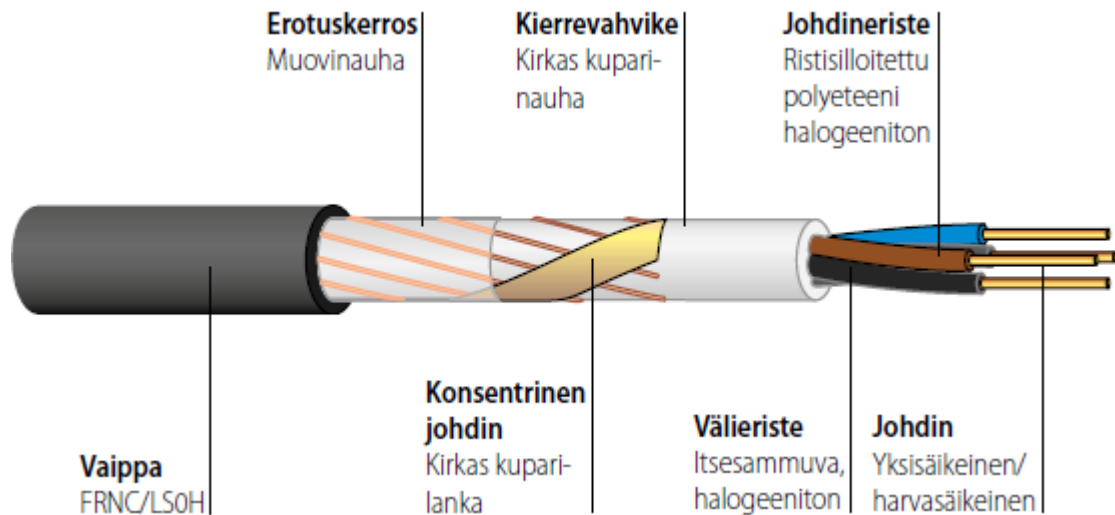
Jokaisella rakenneosalla on oma tehtävänsä kaapelin toiminnan kannalta. Rakenneosat ja niiden tehtävät ovat:

1. *Johdin*: toimii sähköön kuljettajana muodostaen galvaanisen yhteyden
2. *Johdinsuoja*: suojaa kaapelin eristettä tasaamalla sähkökenttää ja pienentämällä sähkökentän voimakkuutta eristeen pinnalla
3. *Eriste*: estää sähköön pääsyn ympäristöön ja toisiin johtimiin
4. *Hohtosuoja*: suojaa johdinsuojan tavoin kaapelin eristettä
5. *Kosketussuoja*: toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana (EMI) ja turvallisuuselimenä, estäen vaarallisten kosketusjännitteiden muodostumisen
6. *Vaippa*: tukee kaapelin sisäosia ja suojaa kosteudelta ja mekaaniselta rasitukselta, voidaan tarvittaessa myös armeerata, jos tarvitaan erityistä sähköistä suojaa tai mekaanista kestävyyttä

Kaikki rakenneosat eivät välttämättä ole tarpeellisia riippuen lähinnä kaapelin jännite-
tasosta. Pienemmillä jännitteillä voi riittää, että voimakaapelissa on vain jokaisen kaa-
pelin perusosat, jotka ovat johdin, eriste ja vaippa.

Monijohdinkaapeleista löytyvät käytännössä samat rakenneosat kuin yksijohdinkaape-
lista, mutta ne voivat olla jokseenkin eri tavoilla toteutettuja. Eristys saattaa esimerkiksi
koostua kahdesta osasta, johdineristyksistä tai yhteisestä vyöeristyksestä. Kolmivaihe-
kuormien kaapeleista yleensä vain keskijännitekaapeleiden vaiheet jaetaan kolmeksi
yksijohdinkaapeliksi. Pienjännitekaapelit ovat yleensä monijohdinkaapeleita ja ne voi-
vat sisältää useitakin johtimia.

Voimakaapeleiden kanssa periaatteessa samaa tehtävää hoitavat myös automaatiokaap-
pien ja -laitteiden tasavirtaa syöttävät asennuskaapelit sekä rakennussähköistyksen,
kuten valaistuksen, vahvavirtaiset asennuskaapelit. Näissä sovelluksissa tarvittavat tehot
ja jännitteet ovat huomattavasti pienempiä kuin mitä varsinaisten voimakaapelien syöt-
tämät kolmivaihekuormat tarvitsevat. Kuvassa 8 on esimerkki N2XCH-tyyppisestä
asennuskaapelista. [14; 15]



Kuva 8. N2XCH-asennuskaapeli [16]

3.1.2 Ohjauskaapelit

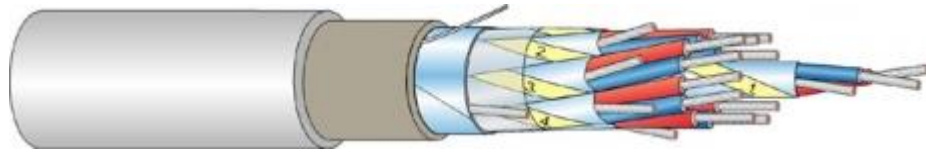
Ohjauskaapelit ovat monijohtimisia kaapeleita, jotka on tarkoitettu ohjaus-, mittaus- ja merkinantosignaalien siirtoon [17]. Signaaleilla ohjataan esimerkiksi venttiilien toimilaitteiden tai sähköisten kytkimien asentoa. Kuvassa 9 on esimerkki MKMO-ohjauskaapelista.



Kuva 9. MKMO-ohjauskaapeli [18]

3.1.3 Instrumentointikaapelit

Instrumentointikaapelit välittävät anturien viestejä mittalaitteille [17]. Signaalien laatu asettaa instrumentointikaapelien rakenteelle ja kaapeloinnille erityisvaatimuksia. Heikoimmat signaalien tasot voivat olla virtasignaaleilla esimerkiksi välillä 4...20 mA ja jännitesignaaleilla 0...100 mV. Ympäröivien laitteiden ja kaapeleiden sähkö- ja magneettikentät voivat helposti häiritä näin matalatasoisia signaaleja. Pahimmassa tapauksessa instrumentointikaapeliin liittyvät herkäät elektroniikkapiirit voivat vaurioitua ylijännitteestä. Signaaleja joudutaan tästä syystä suojaamaan instrumentointikaapelien rakenteella ja sijoittelulla erityisesti voimakaapeleihin nähden. Kuvassa 10 on havainnollistettu EMC-suojatun instrumentointikaapelin rakennetta. Sähkömagneettisille häiriöille alttiiden signaalien siirrossa suositetaan yleensä kuvan mukaisesti kierrettyjä parihoitimia, jotka lisäksi ympäröidään suojalla. Parihoitimien kiertäminen toistensa ympäri ja suojaaminen estää sähkömagneettisten häiriöiden siirtymistä välitettävään signaaliin. [14]



Kuva 10. KJAAM-HF-instrumentointikaapeli [19]

Korkeataajuisten signaalien välittämiseen käytetään yleensä koaksiaalikaapeleita kiertettyjen pari johdinkaapeleiden sijasta. Ydinvoimalaitoksilla esimerkiksi neutronivuon ja säteilymittauksen signaalit ovat yleensä tällaisia. Kuvassa 11 näkyy koaksiaalikaapelin rakenne, johon kuuluvat sisäjohtin, eriste, ulkojohtin ja vaippa. Sisäjohtin toimii signaalin menoreittinä ja ulkojohtin paluureittinä. Ulkojohtin voi olla kuvan mukaisesti punottu tai täysin yhtenäinen.



Kuva 11. RG-59 -koaksiaalikaapeli [20]

3.1.4 Tiedonsiirtokaapelit

Tiedonsiirtokaapeleiden tehtävänä on siirtää tietoa kahden laitteen välillä. Ne voivat olla perinteisiä kuparijohtimisia kaapeleita tai valokuitukaapeleita. Valokuidut siirtävät tietoa optisesti valon avulla. Valokuitukaapelit eivät siten häiriinny tai häiritse muita kaapeleita tai laitteita. Tästä syystä valokuitukaapeleita koskevat yleensä hieman lievemmat erotteluvaatimukset. Perinteiset kuparijohtimiset kaapelit ovat kuitenkin edelleen herkkiä sähkömagneettisille vuorovaikutuksille. Kuvassa 12 on esimerkki valokuitukaapelista. [14]



Kuva 12. Palonkestävä valokuitukaapeli [21]

Telekaapelit huolehtivat puhelinyhteyksien ja hälytysjärjestelmien tiedonsiirrosta ja ne ovat tyypillisesti perinteisiä kuparijohtimisia kaapeleita. Kuvassa 13 on esimerkki telekaapelista. [15]



Kuva 13. KLM 4X0,8 R100 -telekaapeli [22]

3.1.5 Erikoiskaapelit

Erikoiskaapelit tai järjestelmäkaapelit ovat tietyn järjestelmän toimintaan erityisesti suunniteltuja kaapeleita, jotka voivat suorittaa useita tehtäviä samanaikaisesti. Ne voivat esimerkiksi huolehtia järjestelmän sisäisestä sähkönsyötöstä sekä sisältää termoelementtejä, jotka mittaavat lämpötilaa. Erikoiskaapeleille saatetaan asettaa erityisen tiukkoja erotteluvaatimuksia virheettömän toiminnan takaamiseksi.

3.2 Sähkötekniset ilmiöt

Sopivaa kaapelityyppiä, asennustapaa ja kaapeleiden erottelua miettiessä täytyy ymmärtää kaapelointiin liittyvät keskeiset sähkötekniset ilmiöt, jotka esitellään seuraavaksi lyhyesti. Tarkoituksena on lähinnä saada käsitys, mitä asioita kaapeloinnissa tulee mahdollisesti huomioida. Kaikkia asioita ei pystytä tämän työn puitteissa täsmällisesti selittämään.

3.2.1 Kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuuden määrää eristeaineen lämpötilakestoisuus ja kaapelin lämpenemä. Jotta kaapelin eristeaine ei vanhentuisi liian nopeasti, on eristeelle määriteltä suurin sallittu käyttölämpötila. Ydinvoimalaitosten kaapeleiden eristeaine on yleensä ristosilloitettua polyeteeniä (XLPE), jonka suurin sallittu käyttölämpötila on 90 °C ja tarvittaessa hätätilanteissa 140 °C.

Kaapelin lämpenemä riippuu kaapelissa kulkevan virran tuottamasta lämmöstä, ympäristön lämpötilasta sekä lämmönsiirron tehokkuudesta, johon vaikuttavat kaapelin rakenne, materiaalit ja ympäristötekijät, kuten asennustapa, lämpötila sekä ilmankosteus. Kaapelin kuormitettavuus määräytyy aina kaapelireitin lämmönsiirron kannalta heikoimman kohdan mukaan. Lämmön tasoittuminen kaapelin pituussuunnassa on vähäistä, jolloin esimerkiksi heikosti lämpöä johtava läpivienti voi olla merkittävä kaapelin kuormitettavuutta pienentävä tekijä. [14; 15]

3.2.2 Terminen oikosulkukestoisuus

Myös kaapelin terminen oikosulkukestoisuus määräytyy kaapelin eristeen lämmönkestävyydestä ja kaapelin lämpenemästä. Oikosulkutapauksia varten kaapeleille määritellään suurin sallittu oikosulkulämpötila, joka XLPE-eristeelle on 250 °C. Kaapelin lämpenemisen oikosulussa määräävät johdinaine, poikkipinta, lämmön diffuusio eristykseseen, oikosulkuvirran ekvivalenttinen tehollisarvo sekä oikosulun kesto aika. Oikosulut kestävät kaapelin ulkopinnan lämmönsiirron kannalta suhteellisen lyhyen ajan. Tästä syystä kaapelin ulkopinnan lämmönsiirrolla ei käytännössä katsoen ole merkitystä eristyksen lämpötilamuutokseen oikosuluissa. Kaapelin suurimmalla oikosulkuvirralla tar-

koitetaan yleensä virtaa, joka yhdessä sekunnissa nostaa kaapelin lämpötilan suurimmasta sallitusta käyttölämpötilasta suurimpaan sallittuun oikosulkulämpötilaan. Termistä oikosulkukestoisuutta voivat rajoittaa myös kaapelien johdinliitokset.

3.2.3 Dynaaminen oikosulkukestoisuus

Kaapelin dynaaminen oikosulkukestoisuus riippuu kaapelin rakenteen ja kiinnityksen kestävyyydestä oikosuluissa. Oikosulussa kaapelin vaiheiden välillä esiintyy sähkömagneettisia voimia, jotka pyrkivät repimään vaihejohtimia erilleen toisistaan. Sähkömagneettinen voima F (N/m) on riippuvainen oikosulkuvirran i_s (kA) huippuarvon neliöstä ja johtimien keskipisteiden välisestä etäisyydestä a (m):

$$F = 0,2 * \frac{i_s^2}{a}. \quad (1)$$

Monijohdinkaapeleiden tapauksessa dynaamista oikosulkukestoisuutta rajoittaa kaapeleissa yleensä olevan vyöeristyksen kestävyys. Sidokset, vaipat ja armeeraus vahvistavat monijohdinkaapelia sähkömagneettisia voimia vastaan. Yksijohdinkaapeleiden oikosulkukestoisuus on riippuvainen asennustavasta. Rajoittavana tekijänä täytyy yleensä tarkastella yksijohdinkaapeleiden kiinnitystä toisiinsa, etteivät kiinnitykset irtoa, jolloin kaapelit pääsevät erkaantumaan toisistaan ja mahdollisesti tippumaan kaapelihyllyltä aiheuttaen henkilövaaraa tai muita vaurioita. [14; 15]

3.2.4 Jännitteenalenema

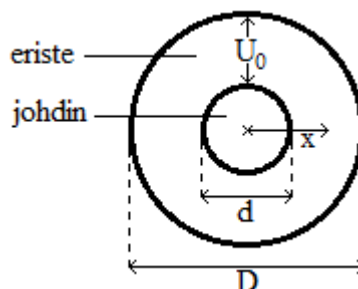
Teollisuudessa käytetyssä maksimissaan 10 kV kaapelissa syntyy pääasiassa ohmisten ilmiöiden kautta jännitteenalenema eli potentiaaliero kaapelin päiden välille. Kaapelin loppupään jännitteen tulee olla kuormalleen riittävä, jotta kuorma pystyy toimimaan häiriöttä. Jännitteenalenema ei saa siis kasvaa liian suureksi. Jännitteenalenema voi tulla merkittäväksi kaapelin mitoitusmekanismiksi yleensä vasta pitkällä kaapelireiteillä. Jos jännitteenalenema kasvaa liian suureksi, on valittava poikkipinnaltaan paksumpi kaapeli, jonka jännitteenalenema jää pienemmäksi pienemmän impedanssin johdosta. [14; 15]

3.2.5 Jännitteenkestävyys

Kaapelin jännitteenkestävyys tarkoittaa kaapelin rakenteen kykyä sulkea kaapeliin muodostuva sähkökenttä kaapelin sisälle siten, että osittaispurkauksia tai läpilyöntejä ei pääse syntymään. Jännitteenkestävyyden muodostaa pääasiassa kaapelin eriste. Suuremmat käyttöjännitteet vaativat parempaa eristävyyttä, jolloin jännitteenkestävyyttä voidaan parantaa lisäksi johdin- ja hohtosuojalla. Läpilyöntien estämiseksi eristyksen on kestävä siinä esiintyvä sähkökentänvoimakkuus E , joka noudattaa kaavaa:

$$E = \frac{U_0}{x \ln \frac{D}{d}}, \quad (2)$$

missä U_0 on eristyksen yli vaikuttava jännite, x etäisyys johtimen keskipisteestä, d johtimen (ja johdinsuojan) halkaisija ja D eristyksen halkaisija. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Kaapelin eristyksen sähkökentänvoimakkuuteen vaikuttavat tekijät

Sähkökentänvoimakkuus on siis kääntäen verrannollinen etäisyyteen, jolloin sen voimakkuus on suurimmillaan johtimen pinnalla ja pienimmillään eristyksen ulkopinnalla. Kaapelin eriste vanhenee lämmön vaikutuksesta, mikä heikentää eristyksen läpilyöntilujuutta. Vanheneminen voi aluksi johtaa osittaispurkauksiin, jotka hiljalleen tunkeutuvat syvemmälle eristeeseen, mikä heikentää eristävyyttä. Lopulta eriste pettää ja sähkö pääsee kulkeutumaan johtimesta ympäristöön johtumalla impedanssin kautta tai valokaarena. Tästä syystä kaapeleita pitäisi aina käsitellä niin kuin paljasta johdinta. [14; 15]

3.2.6 Sähkömagneettiset häiriöt

Sähkömagneettiset häiriöt (EMI) voidaan jakaa alkuperän, ominaisuuksien, etenemistavan ja kytkeytymistavan perusteella. Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) tarkoittaa järjestelmän, laitteen tai kaapelin kykyä toimia toimintaympäristössään siten, että se ei häiriinny ympäröivistä sähkömagneettisista häiriöistä eikä se myöskään aiheuta häiriöitä itselleen tai ympäröiville järjestelmille, laitteille tai kaapeleille. Seuraavaksi käsitellään kaapeloinnissa esiintyviä sähkömagneettisia häiriöitä niiden kytkeytymistavan perusteella.

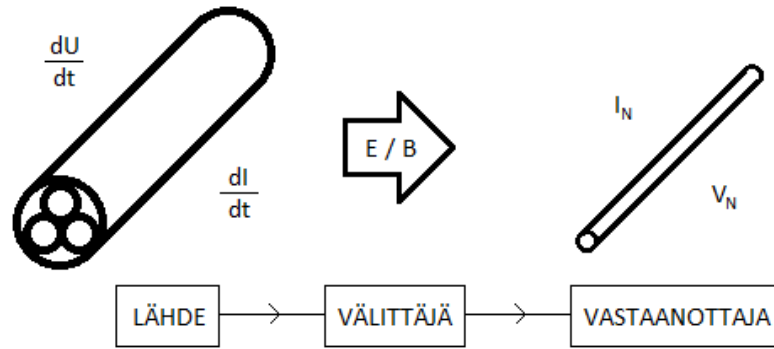
Sähkömagneettiset häiriöt voivat kytkeytyä neljällä tavalla:

1. Kapasitiivisesti sähkökentän välityksellä
2. Induktiivisesti magneettikentän välityksellä
3. Galvaanisesti johtumalla yhteisen impedanssin kautta
4. Säteilemällä sähkö- ja magneettikentän yhteisvaikutuksella

Sähkömagneettisen häiriön kytkeytymiseen tarvitaan häiriöketju, joka muodostuu kolmesta tekijästä:

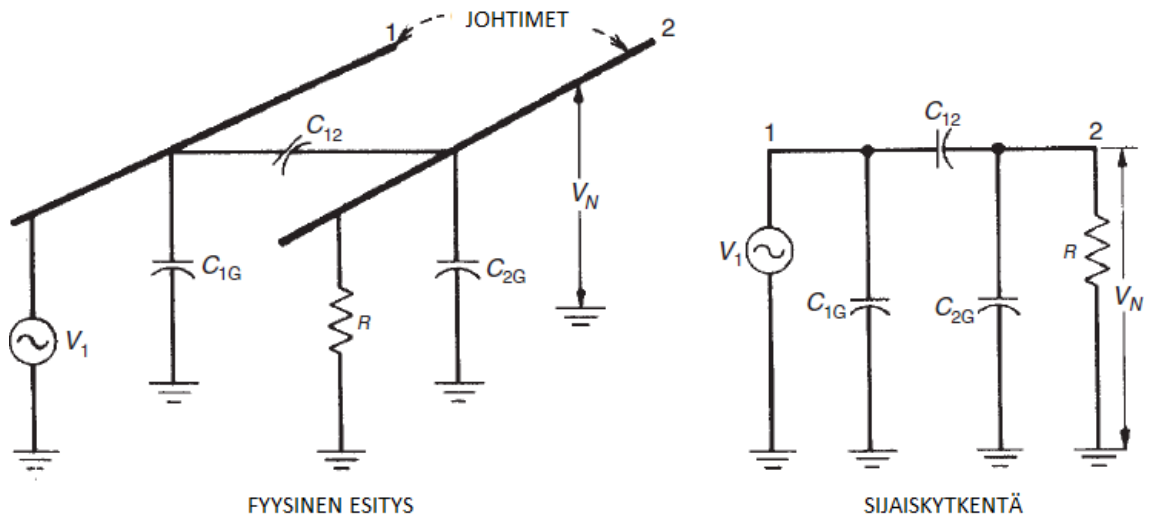
1. Häiriön lähde
2. Häiriön vastaanottaja, joka on altis häiriöille
3. Kytkeytymiskanava, joka välittää häiriön lähteeltä vastaanottajalle

Sähkömagneettisen häiriön syntymiseksi täytyy häiriön lisäksi olla sopivalla taajuusalueella, jolle vastaanottaja on altis, amplitudiltaan riittävä vaikuttaakseen vastaanottajaan ja ajanhetken on oltava oikea, jolloin vastaanottaja on altis häiriintymään. Kaapeloinnissa tyypillisesti eniten huomiota vaativa häiriöketju (kuva 15) muodostuu häiriön lähteenä toimivasta voimakkaasta (häiritsevä kaapeli), häiriön välittävistä sähkö- ja magneettikentistä sekä häiriön vastaanottavasta matalatasoisesta signaalia kantavasta kaapelista (häiriintyvä kaapeli), kuten instrumentointikaapelista.



Kuva 15. Kaapeloinnin tyypillinen häiriöketju

Häiriön **kapasitiivinen kytkeytyminen** tapahtuu sähkökentän ja kaapeleiden välisten hajakapasitanssien välityksellä. Tilannetta kahden johtimen välillä havainnollistaa kuva 16, jossa vasemmalla on fyysinen esitys ja oikealla tilannetta vastaava sijaiskytkentä.



Kuva 16. Häiriön kapasitiivinen kytkeytyminen 1 [23]

Kuvassa C_{12} on johtimien 1 ja 2 välinen hajakapasitanssi, C_{1G} johtimen 1 ja maan välinen kapasitanssi, C_{2G} johtimen 2 ja maan välinen kokonaiskapasitanssi ja R on piirin 2 maadoitusresistanssi. Resistanssi R riippuu suoraan johtimeen 2 liittyvästä piiristä. Kapasitanssi C_{2G} käsittää johtimen 2 ja maan välisen hajakapasitanssin sekä minkä tahansa johtimeen 2 kytkeytyvän piirin vaikutuksen. Johtimen 1 jännite V_1 toimii häiriön lähteenä ja johdin 2 häiriön vastaanottajana. Suoraan häiriön lähteen yli kytkeytyvät kapasitanssit, kuten C_{1G} , eivät vaikuta häiriöiden kytkeytymiseen.

Johtimen 2 ja maan välille muodostuva häiriöjännite V_N saadaan yhtälöstä:

$$V_N = \frac{j\omega[C_{12}/(C_{12}+C_{2G})]}{j\omega+1/R(C_{12}+C_{2G})} V_1. \quad (3)$$

Yhtälöä voidaan yksinkertaistaa usein käytännössä toimivalla oletuksella:

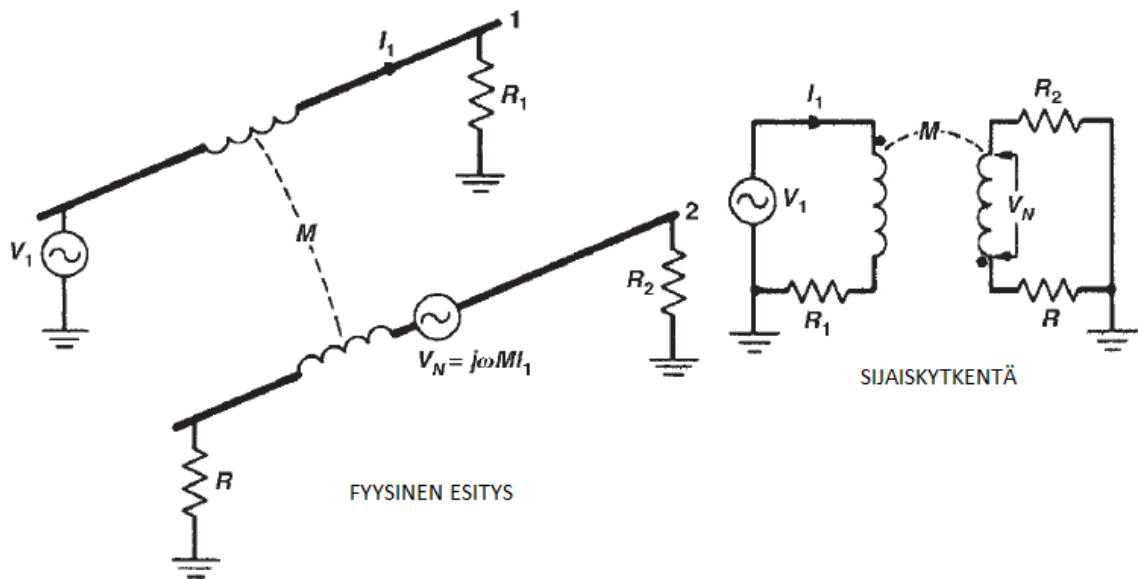
$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12}+C_{2G})}, \quad (4)$$

jossa siis oletetaan piirin 2 maadoitusresistanssin muodostaman impedanssin olevan huomattavasti pienempi kuin hajakapasitanssien C_{12} ja C_{2G} . Tällöin yhtälö (3) yksinkertaistuu muotoon:

$$V_N = j\omega RC_{12} V_1. \quad (5)$$

Yhtälöstä (5) nähdään, että häiriöjännite V_N riippuu suoraan häiriölähteen taajuudesta ($\omega = 2\pi f$), häiriintyvän piirin maadoitusresistanssista R , keskinäiskapasitanssista C_{12} ja jännitteestä V_1 . Jos oletetaan, että häiriölähteen jännitteeseen ja taajuuteen ei voida vaikuttaa, jää jäljelle vain kaksi parametria, jotka vaikuttavat kapasitiiviseen kytkeytymiseen: R ja C_{12} . Kapasitiivisesti kytkeytyvää häiriöjännitettä V_N voidaan siten pienentää, joko pienentämällä vastaanottavan piirin maadoitusresistanssia R , tai pienentämällä keskinäiskapasitanssia C_{12} . Kapasitanssi C_{12} pienenee orientoimalla johtimet sopivasti, suojauksella (*shielding*) tai johtimien fyysisen etäisyyden kasvattamisella.

Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän ja kaapeleiden välisen keskinäisinduktanssin välityksellä. Kahden johtimen välillä tapahtuvaa induktiivista kytkeytymistä havainnollistaa kuva 17.



Kuva 17. Häiriön induktiivinen kytkeytyminen [23]

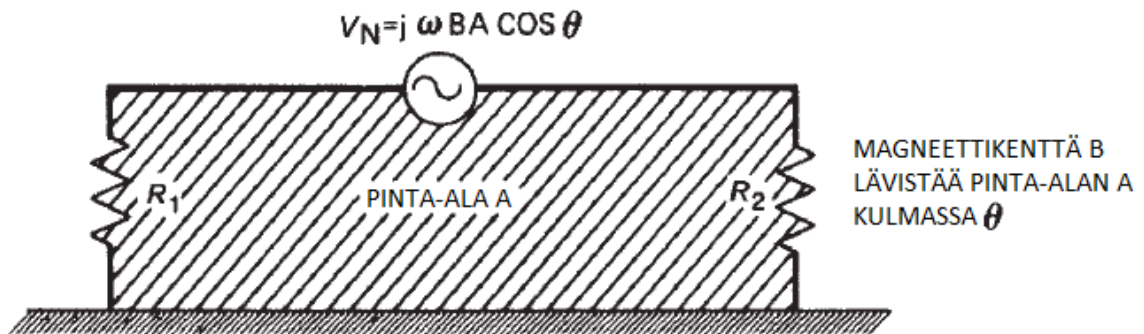
Häiriön lähteenä toimii häiritsevän johtimen muuttuva (sinimuotoinen) virta, joka muodostaa muuttuvan magneettikentän ympärilleen. Muuttuvan magneettikentän läpäistessä häiriintyvän johtimen muodostaman piirin, syntyy myös siihen magneettikenttä keskinäisinduktanssin kautta:

$$M_{12} = \frac{\phi_{12}}{I_1}, \quad (6)$$

jossa M_{12} on johtimien 1 ja 2 välinen keskinäisinduktanssi, I_1 johtimessa 1 kulkeva virta ja ϕ_{12} piiriin 2 virran I_1 vaikutuksesta muodostuva magneettivuoto. Piiriin, joka muodostaa suljetun pinta-alan, muodostuu magneettivuon vaikutuksesta häiriöjännite:

$$V_N = j\omega B A \cos\theta, \quad (7)$$

jossa B on magneettivuon tiheys, A häiriintyvän suljetun piirin pinta-ala ja θ johtimien välinen kulma. Häiriintyvä piiri ja sen muodostama pinta-ala on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Häiriintyvän piirin muodostama pinta-ala [23]

Koska termi $B A \cos\theta$ kuvaa kokonaismagneettivuota (ϕ_{12}), joka kytkeytyy häiriintyvän piirin kanssa, voidaan yhtälöt (6) ja (7) yhdistää:

$$V_N = j\omega M_{12} I_1 = M_{12} \frac{di_1}{dt}. \quad (8)$$

Yhtälöitä (7) ja (8) voidaan käyttää perustana kuvaamaan kahden piirin välistä induktiivista kytkeytymistä. Häiriöjännitettä V_N , jonka induktiivinen kytkeytyminen aiheuttaa, voidaan vähentää pienentämällä magneettivuon tiheyttä B , pinta-alaa A tai termiä $\cos\theta$. Magneettivuon tiheys on kääntäen verrannollinen etäisyyteen, jolloin B pienenee piirien etäisyyttä kasvattamalla. B pienenee myös kiertämällä häiritsevän piirin johtimia toisensa ympäri, jos virta kulkee vain kierrettyissä parihohtimissa. Kierrettyjen parihohtimien magneettikentät kumoavat tällöin toisensa, koska menovirta ja paluuvirta kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Pinta-ala A pienenee sijoittamalla häiriintyvä piiri lähemmäksi maatasoa, jos paluuvirta kulkee maan kautta, tai käyttämällä häiriintyvässä kaapelissa kierrettyjä parihohtimia, jos paluuvirta kulkee toisessa parihohtimessa. Termiin $\cos\theta$ voidaan vaikuttaa piirien orientaatiolla. Samansuuntaisille kaapeleille $\cos(0^\circ) = 1$ ja suorassa kulmassa risteäville $\cos(90^\circ) = 0$. [23]

Galvaanisesti johtumalla kytkeytyvä häiriö vaatii häiriön lähteen ja vastaanottajan välille yhteisen impedanssin. Häiriön lähteenä voi toimia esimerkiksi oikosulkumoottorin käynnistymisessä oikosulkeutuva roottori, mikä pudottaa jännitteen hetkellisesti noltaan. Kaapeli välittää häiriön galvaanisen yhteyden kautta syöttökiskolle, joka kokee häiriön johdosta jännitekuopan. Muita häiriön aiheuttajia voivat olla muun muassa salamien iskut, maasulut ja tehoelektroniikan kytkinlaitteet. Sähköjärjestelmä suunnitellaan kestäväksi siinä normaalisti esiintyvät häiriöt ongelmitta, mutta häiriöt voivat kytkeytyä muihin järjestelmiin kapasitiivisen ja induktiivisen kytkeytymisen välityksellä, vaikka galvaanista yhteyttä ei olisikaan. [24-26]

Sähkömagneettisten häiriöiden siirtyminen **säteilemällä** tapahtuu niin sanotussa kaukokentässä. Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttiä tarkastellaan erillisinä komponentteina, kuten edellä tehtiin kapasitiivisen ja induktiivisen kytkeytymisen yhteydessä. Kaukokentässä sähkö- ja magneettikentän vaikutukset käsitellään samana aaltona. Säteilevän häiriön syntyyn ja vastaanottamiseen vaaditaan antenni. Kaapeli toimii antennina, kun sen pituus on moninkerta signaalin neljännesosa-aallonpituudesta. Sähkömagneettisen aallon aallonpituus voidaan ratkaista kaavasta:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (9)$$

missä f on signaalin taajuus, c valonnopeus ja λ aallonpituus. Esimerkiksi 100 kHz taajuudella aallonpituus on 3 km ja 300 MHz taajuudella 1 m. Näin ollen säteilevät häiriöt alkavat tulla ongelmallisiksi vasta suuremmilla taajuuksilla. Sähkönjakelussa käytetyllä 50 Hz taajuudella sähkömagneettisten häiriöiden siirtyminen säteilemällä on käytännössä mahdotonta. Mahdollisia häiriölähteitä voivat olla korkeita taajuuksia käyttävät laitteet, kuten telekommunikaatiolaitteet, ja korkealla kellotaajuudella toimivat puolijohdekytkimet.

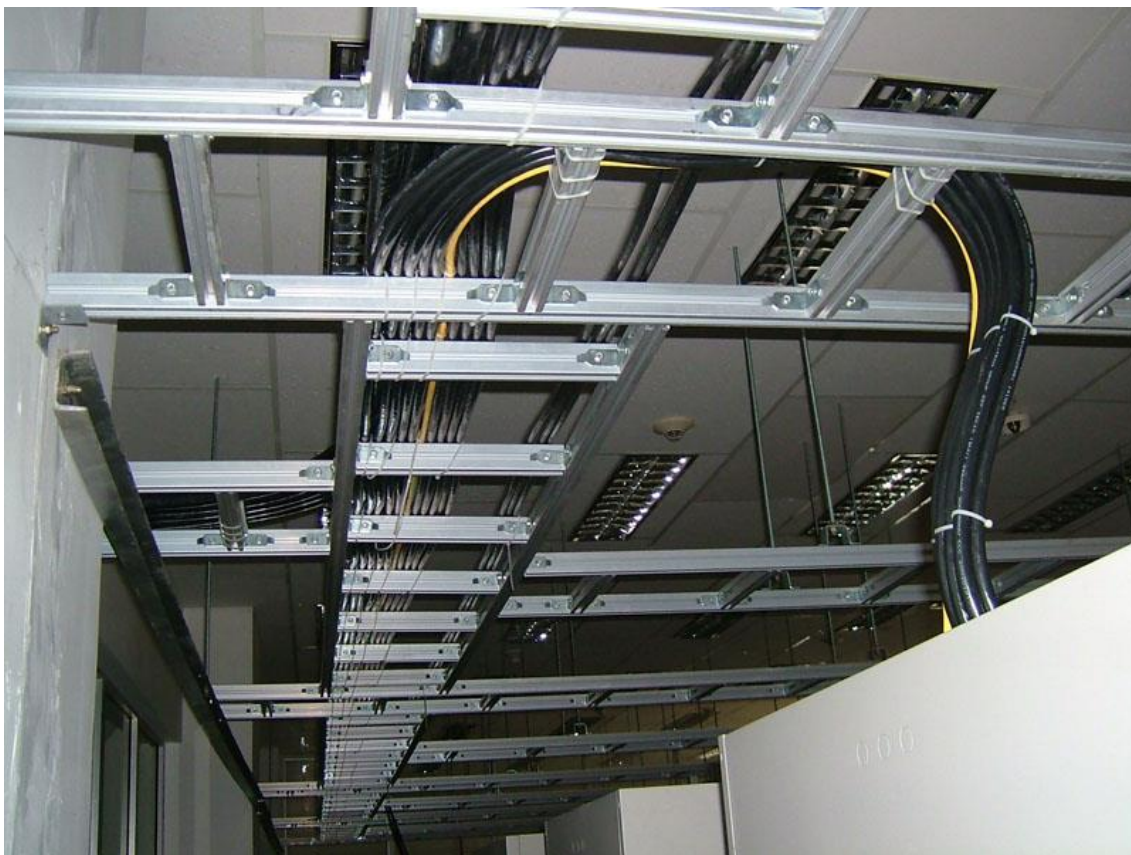
Kaikkia asioita sähkömagneettisista häiriöistä ei pystytä tämän työn puitteissa täsmällisesti esittämään. Sähkömagneettisia häiriöitä käsittelevää kirjallisuutta on kuitenkin saatavilla paljon. Hyviä kirjoja ovat tässäkin työssä viitatut H. W. Otin *Electromagnetic Compatibility Engineering* (J Wiley & Sons, 2009) [23] ja C. R. Paulin *Introduction to Electromagnetic Compatibility* (J. Wiley & Sons, 2006) [25]. Sähkömagneettisilta häiriöiltä suojautumista (EMC-suojauksia) käsitellään lisää kappaleessa 5.2.3.

3.3 Kaapeloinnin asennustavat

Kaapeloinnin asennustavan valinnalla on merkittävä vaikutus muun muassa kaapeleiden kuormitettavuuteen, sähkömagneettisten häiriöiden leviämiseen sekä tulipalojen syttymiseen ja leviämiseen. Seuraavana esitellään ydinvoimalaitosten kaapeloinnissa tyypillisesti käytetyt asennustavat. Kaapeloinnin suojausta käsitellään myöhemmin luvussa 5.

3.3.1 Kaapelihyllyt

Kaapeleiden asennus kaapelihyllyille on ylivoimaisesti yleisin tapa kaapeloinnin toteutukselle teollisuudessa. Kuvassa 19 on esimerkki hyllyasennuksesta, jossa käytetään kaapelitikkaita. Hyllyasennuksessa kaapelit asennetaan kaapelihyllyjen päälle ja kaapelit kiinnitetään tarvittaessa kaapelihyllyyn. Yksijohtimiset keskijännitekaapelit täytyy kiinnittää myös toisiinsa dynaamisen oikosulkukestoisuuden takaamiseksi. Riittävän lämmönsiirron takaamiseksi kaapeleita ei saisi asentaa liikaa yhdelle hyllylle. Yleinen sääntö on ettei kaapeleita saa tulla kaapelihyllyjen reunojen yli. Paljon kaapeleita sisältävä hylly kerää myös pölyä ja likaa tehokkaasti, mikä heikentää ajan mittaa kaapeleiden lämmönsiirtoa.



Kuva 19. Kaapeloinnin hyllyasennus kaapelitikkailla [27]

Paljon erilaisia kaapeleita sisältävillä kaapelireiteillä kaapelihyllyjä joudutaan asentamaan useita päällekkäin. Tällöin täytyy varmistua riittävästä etäisyydestä hyllyjen välillä. Vaadittuun etäisyyteen vaikuttavat muun muassa asennuksen vaatima tila ja esiintyvät sähkömagneettiset häiriöt. Standardit [28] suosittelevat asentamaan päällekkäiset kaapelihyllyt jännitteen mukaan ylhäältä alaspäin laskevassa järjestyksessä. Tällöin suurimman jännitteen voimakaapelit tulevat ylimmäksi ja kaikista herkimpiä signaaleja välittävät kaapelit alimmaksi. Myös päinvastaista asennusjärjestystä käytetään. [14; 15]

3.3.2 Kaapelikanavat

Kaapelikanavat erottavat kaapelit kokonaan muusta teollisesta prosessista ja muista järjestelmistä ja toimivat samalla omina palo-osastoina. Kaapelit saavat tällöin olla omassa rauhassaan, mikä on yksi kaapeloinnin tavoitteista. Kaapelikanavissa kaapelit voidaan asentaa normaaliin tapaan kaapelihyllyille kuvan 20 mukaisesti. Tarvittaessa kaapelikanaviin voidaan asentaa myös teollisessa prosessissa tarvittavia putkia mutta ne voivat rikkoontuessaan vahingoittaa kaapeleita.



Kuva 20. Kaapelikanava [29]

3.3.3 Kaapelilattiat

Kaapelilattioita käytetään erityisten sähkötilojen kaapelointiin, joissa sijaitsee useita sähkökojeistoja tai automaatiokaappeja. Kuvassa 21 on esimerkki kaapelilattiasta. Kaapelilattia muodostaa korotetun lattian tai valelattian, jonka alle kaapelit asennetaan. Korotettu lattia tulee tehdä palamattomaksi ja tiiviiksi, jotta pölyä ja roskia ei pääse kerääntymään lattian alle kaapeleiden joukkoon. Läpiviennit kojeistoihin tulee tehdä palonkestäviksi siten, että läpivienti estää palon, kaasujen ja mahdollisen sprinkleriveden leviämisen kojetiloihin. Kaapelit on sijoitettava järjestelmällisesti erilleen lattian alle ja huolehdittava ettei lämpötila kohoa liikaa. Kaapelilattioissa pyritään noudattamaan erottelu- ja etäisyysvaatimuksia mahdollisuuksien mukaan. Useasti tämä johtaa erilaisten metallisten suojien käyttämiseen tilarajoitusten takia. Erityistapauksia kaapelilattioista ovat valvomot, joiden alla kaapeleita joudutaan viemään tiiviisti yhdessä paikassa. [14; 15]



Kuva 21. Kaapeleita korotetussa lattiassa [30]

3.3.4 Läpiviennit

Kaapeleita joudutaan usein viemään kiinteiden rakenteiden läpi, jolloin tarvitaan läpivientikanava, joka avaa reitin kaapeille sekä tiivistää kanavan. Läpivienti tulee kaikissa tapauksissa tiivistää mahdollisimman hyvin, jotta tulipalojen leviäminen hidastuu sekä savukaasujen leviäminen estetään. Ydinvoimalaitoksilla läpiviennit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin:

- Paloseinän läpivienti
- Suojarakennuksen läpivienti

Paloseinän, eli paloteknisesti luokitellun rakenteen, läpiviennin tulee olla kaikissa asennuksissa vähintään samaa paloteknistä luokkaa kuin itse rakenne on, jotta palo ei pääse leviämään myöskään läpiviennin kautta. Suojarakennuksen läpivientien on kestävä samat lämpö- ja painekuormat kuin itse suojarakennuksenkin sekä suojarakennuksen sisällä olevat säteilyolosuhteet jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa (LOCA). [31]

Kaapeloinnin kannalta läpiviennissä tulee huomioida kaapeleihin kohdistuva mekaaninen rasitus, kaapelien kuormitettavuuden heikentyminen, erottelukysymykset sekä kaapelien välinen paloturvallisuus. Kaapelihyllyt on päätettävä ennen läpivientiä eikä niitä saa viedä läpiviennin läpi. [14; 32; 33]

3.3.5 Kaapelipäätteet

Kaapelipäätteen olennainen tehtävä on tuoda kaapelin johtimet eristyksestä esiin kaapelin liittämisen mahdollistavien kytkentöjen tekemiseksi. Kaapelin päättäminen aiheuttaa olennaisia muutoksia kaapelin rakenteeseen, mikä johtaa erilaisten sähköisten rasitusten ilmenemiseen kuin itse kaapelissa. Tavallisesti riittää, että kaapelipääte tiivistää kaapelin pään ja suojaa sitä mekaanisesti. Suuremmilla jännitteillä kaapelipäätteen tulee myös hallita jänniterasituksia. Yli 6 kV keskijännitekaapeleissa on yleensä hohtosuoja, jonka päättymiskohdassa kaapelia päätettäessä sähkökentänvoimakkuus kasvaa huomattavasti suuremmaksi kuin kaapelissa. Tällöin ilman läpilyöntilujuus saattaa ylittyä, jos kaapelipäätteessä ei käytetä kentänohjausta. Kentänohjaukseen käytetään kapasitiivisia tai resistiivisiä rakenteita. Myös matalilla signaalitasoilla kaapeleiden päättäminen oikealla tavalla on tärkeää EMC-suojauksen kannalta. [14]

Kaapelijatkosten sekä kytkentä- ja jatkokoteloiden käyttöä pyritään välttämään ydinvoimalaitoksilla. Kokemus on osoittanut että liitokset voivat löystyä ajan mittaan, mikä kasvattaa liitoksen impedanssia. Kasvanut impedanssi kuumentaa liitoskohtaa ja voi johtaa tulipaloihin. Tästä syystä kaapelit katkaistaan oikeaan pituuteen kaapelikelalta vasta asennuksen yhteydessä tai toimitetaan laitosalueelle valmiiksi oikeanmittaisina, jotta kaapelit saadaan vietyä yhtenäisinä.

3.3.6 Maadoitus

Maadoitus tarkoittaa sähköä johtavien rakenteiden, laitteiden ja kaapelien osan tai osien yhdistämistä maapotentiaaliin yleensä matalaimpedanssisella johtimella. Sähköverkko voi olla myös maasta erotettu eli kokonaan maadoittamaton, kuten ydinvoimalaitosten keskijänniteverkko yleensä on, jottei maasulku johda välittömästi vikalaukaisuun.

Maadoituksen tärkein tehtävä on huolehtia henkilöturvallisuudesta estämällä liian suurien kosketus- ja askeljännitteiden syntyminen. Suomessa tehtävien sähköasennusten henkilöturvallisuutta koskevat vaatimukset esitetään SFS-standardeissa. Kaapeloinnin henkilöturvallisuutta valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Maadoituksella on tärkeä tehtävä myös sähkömagneettisten häiriöiden leviämisen estämisessä. EMC-suojaus ei kuitenkaan koskaan saa ohittaa henkilöturvallisuuden tarpeita, vaan suojaus on toteutettava tällöin muilla keinoilla.

4. YDINVOIMALAITOKSEN KAAPELIJÄRJESTELMÄT

Ydinvoimalaitoksen toiminnassa tarvitaan useita eri sähkö- ja automaatiojärjestelmiä, jotka tarvitsevat tukijärjestelmikseen omat kaapelijärjestelmänsä. Tässä luvussa esitellään ydinvoimalaitoksen tyypilliset kaapelijärjestelmät. Suomalaisten ydinvoimalaitosten ratkaisuissa on joitakin periaatteellisia eroja esimerkiksi käytetyissä jännitetasoissa.

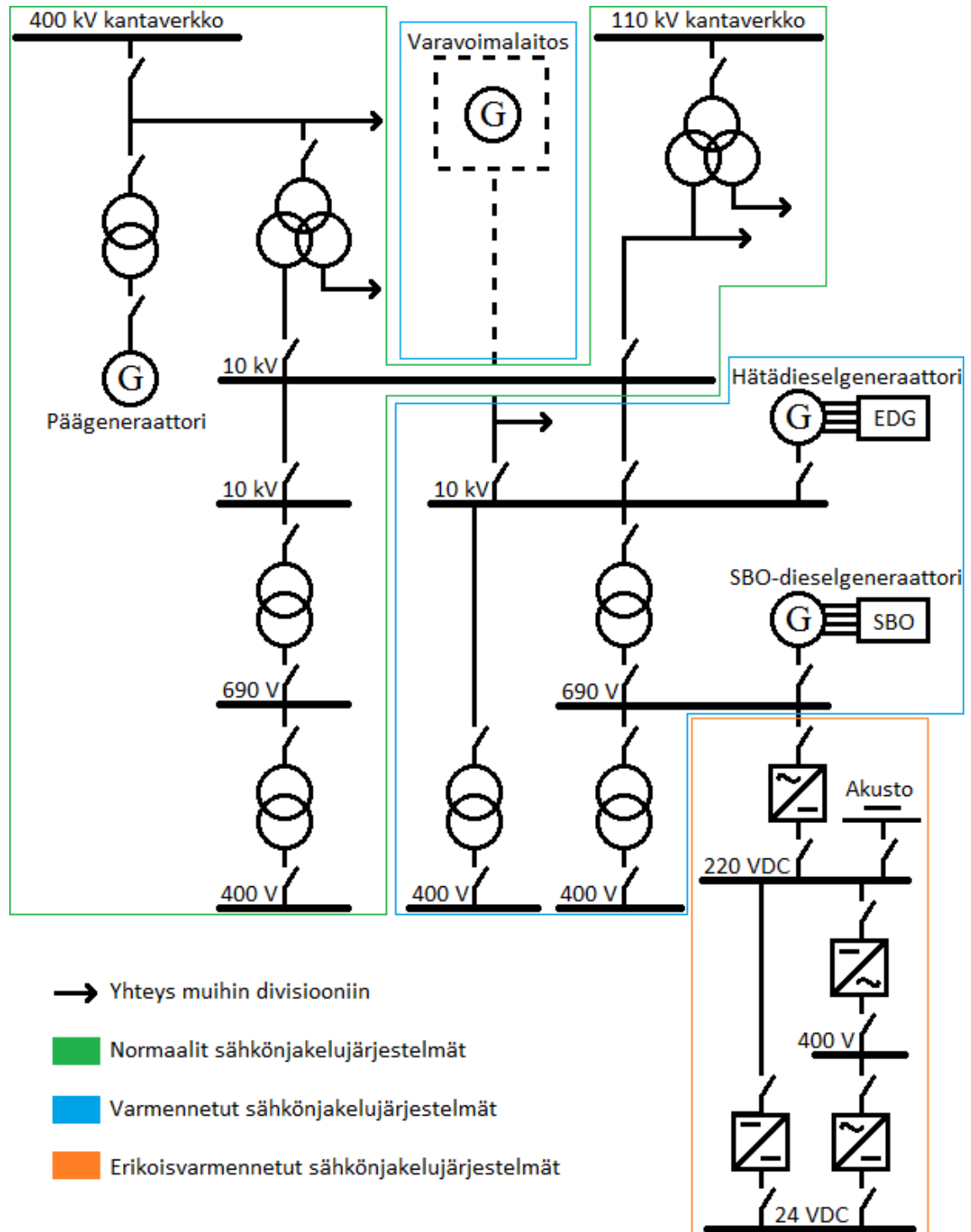
4.1 Omakäyttösähköjärjestelmät

Ydinvoimalaitoksen omakäyttösähköverkko vastaa laitoksen sisäisen sähkönjakelun muodostamisesta. Ydinvoimalaitoksen prosessissa tarvitaan lukuisia sähkömoottoreita erilaisten toimilaitteiden, kuten pumppujen ja venttiileiden, käyttämiseen. Lisäksi sähköä tarvitaan laajan automaation sähköistykseen sekä esimerkiksi rakennussähköistykseen, kuten valaistukseen ja ilmastointiin. Kuormia on siten monenlaisia ja jokaisella on omat vaatimuksensa tarvittavalle teholle (jännitteelle) ja sähkönsyötön luotettavuudelle. Tästä syystä omakäyttösähköverkko jaetaan useampaan toiminnalliseen kokonaisuuteen toimivan sähkönjakelun takaamiseksi.

Omakäyttösähköverkko jaetaan useampaan rinnakkaiseen toiminnallisesti itsenäiseen ja toisistaan fyysisesti eroteltuun divisioonaan, millä varmistetaan turvallisuustoimintojen riittävä luotettavuus. Erottelulla ja toiminnallisella itsenäisyydellä estetään yhdessä divisioonassa esiintyvän vian tai tapahtuman, kuten tulipalon, leviäminen divisioonasta toiseen. Omakäyttösähköverkossa erotellaan lisäksi käyttö- ja turvallisuusjärjestelmät toisistaan. Pääkaavion tasolla asiaa havainnollistavat liitteet A ja B. Liitteessä A on esitetty OL1&2:n pääkaavio, joka havainnollistaa hyvin divisioonien jakoa neljään itsenäiseen divisioonaan. Pääkaaviosta nähdään myös omakäyttösähköverkkoon liittyvät erilaiset teholähteet OL1&2:n tapauksessa. Liitteessä B on esitetty hieman yksinkertaistettumpi versio OL3:n pääkaaviosta, jossa on hahmoteltu myös normaalikäyttöön (turbiinilaitos) ja turvallisuustoimintoihin (reaktorilaitos) osallistuvien sähköjärjestelmien erottelua. [8; 34]

Kuvassa 22 on periaatteellinen kaavio yhdestä ydinvoimalaitoksen sähkönjakelun divisioonasta. Kyseisessä tapauksessa jännitetasoina käytetään 10 kV keskijännitettä, 690 V ja 400 V pienjännitteitä sekä 220 VDC ja 24 VDC tasajännitteitä. 10 kV keskijännitteeseen kytketään laitoksen suurimmat kuormat, joita ovat tyypillisesti suurimmat jäähdytuspumput ja niiden moottorit. Keskijänniteverkko on maasta erotettu, jotta maasulku ei aiheuttaisi välitöntä vikalaukaisua. 690 V pienjännitettä käyttävät laitoksen keskikokoi-

set moottorit. 400/230 V kuormia voivat olla esimerkiksi venttiilien ja pumppujen pienimmät moottorit, valaistus, huoltosähköverkko, ilmastointi ja lämmitys. Pienjännitejärjestelmät ovat tyypillisesti TN-S järjestelmiä. 220 VDC jännitettä käytetään sähkönjakelun apusähköinä sekä esimerkiksi solenoidiventtiilien käytössä. 24 VDC jännitettä käytetään automaation sähköistykseen. [34]



Kuva 22. Periaatteellinen kaavio ydinvoimalaitoksen yhden divisioonan sähkönjakelusta

4.1.1 Normaalit sähkönjakelujärjestelmät

Normaalit sähkönjakelujärjestelmät vastaavat laitoksen normaalista käyttötoiminnasta. Normaalin käyttötoiminnan aikana omakäyttösähköverkko saa syöttönsä normaaleista teholähteistä, joita ovat:

- 400 kV kantaverkko
- Oma päägeneraattori
- 110 kV kantaverkko

Ensisijaisesti omakäyttösähköverkkoa syötetään 400 kV kantaverkosta, johon myös laitoksen tuottama sähkö syötetään. Kantaverkkoliityntä on yhteinen piste kaikille ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmille, minkä takia kantaverkon toiminta vaikuttaa merkittävästi koko ydinvoimalaitoksen suunnitteluun ja toimintaan.

Jos 400 kV kantaverkossa on häiriöitä, se vikaantuu tai yhteys muutoin katkeaa, yritetään siirtyä omakäytölle. Omakäytössä (ts. saarekekäytössä) ydinvoimalaitos toimii omana saarekkeenaan, jonka teholähteenä toimii laitoksen oma päägeneraattori. Omakäytölle siirtyminen on vaativa prosessi, jossa reaktori ja höyryprosessi joudutaan ajamaan nopeasti omakäytön vaatimalle tehotasolle, joka on laitoksesta riippuen noin 7% nimellisestä tehosta. Siirtymisestä ei ole vielä kertynyt paljoa käyttökokemusta eikä sen onnistumisesta voida olla varmoja. Onnistuessaan siirtyminen tuo yhden syvyysuuntaisen puolustustason lisää sekä lisää laitoksen käytettävyyttä sähköntuotantoon.

Kolmas vaihtoehto omakäytölle siirtymisen epäonnistuessa on siirtyä syötönvaihtoautomaatiikalla 110 kV kantaverkkoon. 110 kV kantaverkkoa ei pidetä kovinkaan luotettavana ja häiriöttömänä. Tästä syystä reaktori joudutaan tässä vaiheessa sammuttamaan ja laitos ajetaan hallittuun tilaan.

4.1.2 Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät

Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät ovat turvallisuusjärjestelmiä, joihin liittyy myös joitakin normaalikäyttöön osallistuvia kuormia. Normaalin käyttötoiminnan lisäksi varmennetun sähkönjakelun tulee toimia myös häiriö- ja onnettomuustilanteissa, jolloin kaikki edellä mainitut normaalit teholähteet voivat olla käyttökunnottomia. Ensisijaisesti kuitenkin pyritään edelleen käyttämään normaaleja teholähteitä.

Jos normaalit teholähteet menetetään, kytketään ensiksi kaikki varmennettuun sähkönjakeluun liittyvät kuormat irti ja käynnistetään laitoksen valmiudessa olevat vaihtosähköteholähteet (*standby AC power source*), jotka ovat käytännössä yleensä hätädieselgeneraattoreita (EDG). Hätädieselgeneraattoreita on yksi jokaisessa divisioonassa ja ne kuuluvat turvallisuusluokkaan 2 ja suunnitteluperusteluokkiin DBC3 ja 4. Hätädieselgeneraattoreiden käynnistyttyä kytkentäsekvenssit kytkvät kaikki turvallisuustoimin-

toihin osallistuvat kuormat takaisin varmennettuun sähkönjakeluun. Käyttöjärjestelmien kuormia voidaan kytkeä tämän jälkeen manuaalisesti, jos kapasiteettia on vielä jäljellä.

Uudella OL3:lla tulee olemaan lisäksi erityiset SBO-dieselgeneraattorit (SBO), jotka ovat uusien vaatimusten mukaiset vaihtoehtoiset vaihtosähköteholähteet (*alternate AC power source*). SBO:t pyritään erottelemaan EDG:stä niin, ettei molempia menetettäisi samasta syystä eli yhteisviassa. SBO:t kuuluvat turvallisuusluokkaan 3 ja suunnittelupe-rusteluokkaan DEC.

Varmennettua sähkönjakelua pystytään syöttämään myös laitoksen läheisyydessä ole-valta varavoimalaitokselta, joka voi olla esimerkiksi kaasuturbiini- tai vesivoimalaitos. Luvanhaltijalla on etuoikeussopimus ydinvoimalaitoksensa varavoimalaitokseen, joka takaa sähkön saannin aina tarvittaessa ydinvoimalaitoksen käyttöön. Varavoimalaitos kytketään manuaalisesti syöttämään varmennettua sähkönjakelua aina, kun tälle on tar-vetta.

YVL-ohjeet vaativat lisäksi samalla laitosalueella olevilta ydinvoimalaitosyksiköiltä varayhteydet myös viereisiin yksiköihin. Jos laitosalueella on yksikin yksikkö vielä käynnissä, voidaan siltä syöttää sähköä onnettomuustilanteissa naapuriyksiköille. Häiri-öiden siirtyminen varayhteyttä pitkin tulee estää luotettavasti.

Varmennettuun sähkönjakeluun kuuluvat kuormat kestävät hetkellisen jännitteettömyy-den, joka kestää dieselgeneraattoreiden tai varavoimalaitoksen käynnistymisen ja/tai kytkemisen sekä kuormien kytkentäsekvenssin ajan. Mikäli turvallisuustoimintoa suo-rittava laite vaatii katkeamattoman sähkönsyötön, sijoitetaan se erikoisvarmennettuun sähkönjakeluverkkoon.

4.1.3 Erikoisvarmennetut sähkönjakelujärjestelmät (UPS)

Erikoisvarmennettuun sähkönjakeluun kuuluvat kuormat eivät kestä hetkellistikään sähkönsyötön menetystä. Keskeytymätön sähkönjakelu toteutetaan UPS-järjestelmillä, jotka koostuvat suuntaajista ja akustoista. Vaihtosähkön syötön katketessa, pystyvät akustot jatkamaan sähkönsyöttöä katkeamatta. Suuntaajilla akustojen tasavirta saadaan muutettua myös katkeamattomaksi vaihtovirraksi.

UPSien katkeamaton sähkönsyöttö on elintärkeää esimerkiksi sähkökojeistojen ohjauk-seen tarvittavan apusähkön ja automaation sähköistyksen kannalta. Ilman apusähköä, tarvittavia kytkentöjä ei saada suoritettua, ja vaihtosähkönsyötön palauttaminen vaih-tosähköteholähteiltä estyy, eikä akustoja saada ladattua. Automaatiojärjestelmien palau-tuminen sähkönsyötön katkosta kestäisi kauan.

4.1.4 Sähköjärjestelmien suojaus

Ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmät ja niiden kaapelointi tulee suojata erilaisilta sähköisiltä häiriöiltä ja vioilta. Suojaus toteutetaan selektiivisesti, jolloin tavoitteena on erottaa verkosta pelkästään vioittuneet osat. Suojaus tulee varmistaa aina toissijaisella suojalaitteella, joka toimii, jos ensisijainen suojalaite vikaantuu tai ei toimi. Lisäksi vaarallisten ylijännitteiden leviäminen sähköjärjestelmissä tulee estää. Sähköjärjestelmien ja kaapeloinnin suojauksessa käytettäviä erotus- ja suojalaitteita ovat:

- Sulakkeet ja johdonsuojakatkaisijat
- Releet ja kytkimet
- Mekaaniset tai staattiset erotinlaitteet (esim. moottorigeneraattori-erottaja)
- Ylijännitesuojat (esim. MO-suoja)

Kaapeleiden ylivirtasuojina käytetään sulakkeita ja johdonsuojakatkaisijoita (ts. automaattisulakkeita), joiden tehtävänä on katkaista kaapelin tai siihen kytkettyvän kuorman ylikuormittavat virrat. Kuormilla voi olla lisäksi omia suojalaitteita, kuten moottorisuojakytkin.

Sähköjärjestelmien laajemmasta suojauksesta vastaavat releet ja kytkimet, jotka suojaavat esimerkiksi kokonaisia kiskostoja, muuntajia ja teholähteitä. Releiden tehtävänä on valvoa sähköjärjestelmien toimintaa eri mittaustietojen, kuten jännitteiden, virtojen ja taajuuden avulla sekä huolehtia kytkennöistä häiriöiden ja vikojen ilmetessä. Releet vertaavat mittaustietoja releelle asetettuihin parametreihin ja tarvittaessa ohjaavat katkaisijoiden asentoa tai esimerkiksi muuntajan käämikytkintä. Ydinvoimalaitoksilla on haluttu luottaa perinteiseen ja yksinkertaiseen analogiatekniikkaan, mutta uusille ydinvoimalaitoksille on saatu kelpoistettua myös nykyaikaiset ohjelmistopohjaiset digitaaliset releet.

Erikoisvarmennettu tasasähkön sähkönjakelu erotetaan luotettavasti sitä syöttävästä vaihtosähköverkosta mekaanisilla tai staattisilla erotinlaitteilla. Erotuksella estetään vaarallisten ylijännitteiden leviäminen erikoisvarmennettuun sähkönjakeluun. Mekaaninen erotus voidaan tehdä käytännössä pyörivillä moottorigeneraattori-erottajilla tai kahden akuston järjestelyllä siten, että ladattavana oleva akusto on erotettu mekaanisella kytkimellä suojattavia järjestelmiä syöttävästä akustosta. Mekaanisen erotuksen lisäksi myös staattinen erotus suuntaajissa on mahdollista. Vaihtoehtoisesti tasasähköjärjestelmät voidaan mitoittaa kestäämään huomattavia ylijännitteitä.

Kantaverkosta tulevilta ylijännitteiltä suojaudutaan esimerkiksi passiivisilla metallioksidiventtiilisuojuilla (MO-suojilla). MO-suoja koostuu sarjaan tai rinnan kytketyistä sinkkioksidilieriöistä, jotka suljetaan posliini- tai polymeerikuoreen. Normaalilla käyttöjännitteellä suoja toimii eristeenä. Jännitteen kasvaessa riittävän suureksi MO-suoja muuttuu johtavaksi, estäen ylijännitteen siirtymisen suojan yli.

4.2 Automaatiojärjestelmät

Automaatiojärjestelmien kaapelointi koostuu instrumentointijärjestelmien kaapeloinnista ja tiedonsiirron kaapeloinnista. Instrumentointikaapelit välittävät anturin mittaustiedon mittalaitteelle. Tiedonsiirtokaapelit siirtävät tietoa laitteiden välillä.

Instrumentointijärjestelmien tehtävänä on seurata pääasiassa ydinreaktorin, höyrypiirin ja suojarakennuksen toimintaa. Mitattavia suureita ovat esimerkiksi reaktorin neutroniteho, terminen teho, paine, pinnan korkeus ja pääkiertovirtaus. Tieto suureiden tilasta viedään kaapeleilla automaatiojärjestelmille ja valvomoon ohjaajien käytettäväksi. Signaalit ovat yleensä herkkiä sähkömagneettisille häiriöille, mikä tulee ottaa huomioon erityisesti instrumentointikaapelien kulkiessa voimakaapelien tai muiden vahvojen häiriölähteiden läheisyydessä. Signaalit voivat olla analogisessa tai digitaalisessa muodossa. Reaktorin läheisyydessä olevilta antureilta ja kaapeleilta vaaditaan kestävyyttä myös radioaktiivista säteilyä vastaan.

Automaatiolaitteiden ja tietokoneiden väliset tiedonsiirtokaapelit voivat olla perinteisiä johtavia kuparikaapeleita tai optisia valokuituja. Johtavat kaapelit tulee suojata luotettavasti sähkömagneettisilta häiriöiltä. Valokuitukaapelit ovat luonnostaan kaikissa tapauksissa sähköisesti eroteltuja. [5]

5. YDINVOIMALAITOKSEN KAAPELOINNIN SUOJAUS SISÄISIÄ JA ULKOISIA UHKIA VASTAAN

Ydinvoimalaitosten turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa on huomioitava sisäiset ja ulkoiset uhat. Sisäisiä uhkia ovat esimerkiksi tulipalot, sähkömagneettiset häiriöt ja valokaaret. Ulkoisia uhkia ovat esimerkiksi maanjäristys, tulvat ja salaman iskut. Sisäiset ja ulkoiset uhat voivat olla merkittäviä vaaratekijöitä kaapeloinnin erottelun toteutumiselle. Tarkasteltavat sisäiset ja ulkoiset uhat tulee selvittää aina laitospohtaisesti.

Ensisijaisesti kaapeleita suojataan sisäisiä ja ulkoisia uhkia vastaan sopivien asennustapojen valinnalla sekä kaapelireittien sijoittelulla niin, että kaapelit saisivat olla mahdollisimman rauhassa ympäristön sekä muiden kaapeleiden ja laitteiden vaikutuksilta. Tilarajoitusten takia kaapeleita ei kuitenkaan kaikissa tapauksissa saada vietyä tällaisiin paikkoihin, jolloin kaapeleita täytyy suojata muilla toimenpiteillä.

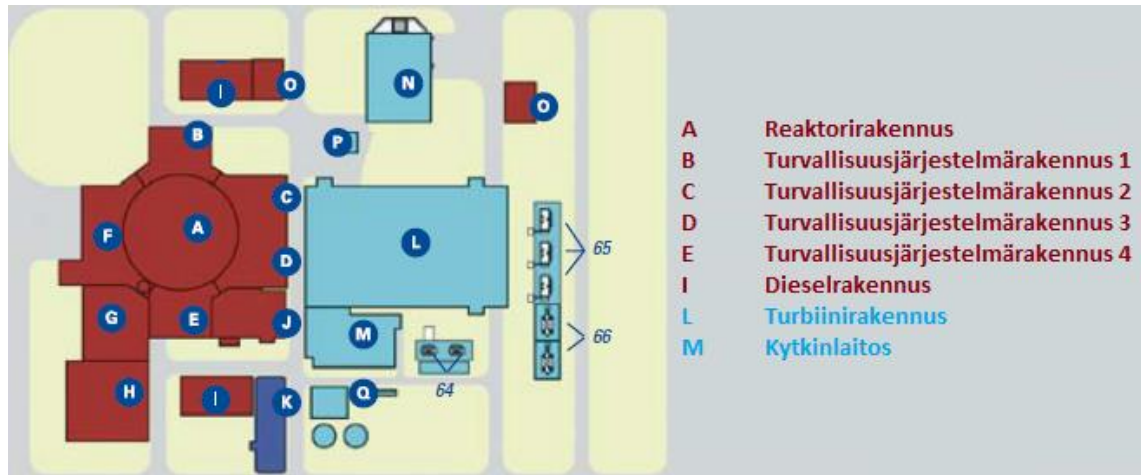
Tässä luvussa esitellään tyypilliset kaapeloinnin erottelun vaarantavat sisäiset ja ulkoiset uhat ja keinot niiltä suojautumiseen. Useiden uhkien torjunnassa merkittävä vaikutus on laitoksen layout-suunnittelulla, jota havainnollistetaan aluksi.

5.1 Layout-suunnittelu

Ydinvoimalaitoksen layout-suunnittelulla on merkittävä vaikutus useiden ydinvoimalaitoksen sisäisten ja ulkoisten uhkien torjunnassa. Layout-suunnittelu eli tila- ja sijoitus-suunnittelu tarkoittaa rakennusten ja järjestelmien tarkoituksenmukaista sijoittelua laitosalueelle siten, että sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutukset jäisivät kaikissa tapauksissa vähäisiksi. Layout-suunnittelu määrittää pitkälti myös kaapelointireittien sijoitusta. [35]

Kuvassa 23 on esitetty OL3:n laitosalueen layout. Kuten kuvasta nähdään, on turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisille osajärjestelmille neljä erillistä rakennusta, jotka on sijoitettu laajasti reaktorirakennuksen ympärille. Jakamalla osajärjestelmät tällä tavoin eri rakennuksiin, saadaan sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutuksia rajattua tehokkaasti vaikuttamaan kerrallaan vain yhteen osajärjestelmään. Samalla myös kaapeloinnit voidaan reitittää kulkemaan erillään toisten osajärjestelmien kaapeloinneista. Ydinvoimalaitoksen vaihtosähkönsyötön onnettomuustilanteissa varmentavat dieselgeneraattorit (4xEDG ja 2xSBO) on myös sijoitettu kauaksi toisistaan kahteen erilliseen dieselrakennukseen. Molempien dieselrakennusten ja kaikkien dieselgeneraattoreiden menettämi-

nen yhtäaikaaisesti esimerkiksi tulipalon, tulvan tai liikennelentokoneen törmäyksen johdosta pitäisi näin ollen olla käytännössä mahdotonta. Layoutista nähdään hyvin myös käyttö- ja turvallisuusjärjestelmien erottaminen omiin rakennuksiinsa. Punaisella väritetyt rakennukset kuvaavat lähinnä turvallisuusjärjestelmiä sisältäviä rakennuksia ja sinisellä väritetyt sisältävät lähinnä käyttöjärjestelmiä.



Kuva 23. OL3 laitosalueen layout [8]

5.2 Sisäiset uhat

Sisäiset uhat ovat ydinvoimalaitoksen sisällä esiintyviä uhkia, jotka voivat vaikuttaa haitallisesti laitoksen turvallisuuteen tai käyttöön. Kaapeloinnin erottelun kannalta merkittävimmät sisäiset uhat ovat tulipalot, räjähdykset, sähkömagneettiset häiriöt, radioaktiivinen säteily, erilaiset mekaaniset uhat sekä tulvat.

5.2.1 Tulipalot

Kokemus on osoittanut kaapeleiden olevan merkittävä paloturvallisuusriski ydinvoimalaitoksilla. Pahimmillaan kaapelipalo on lisännyt merkittävästi reaktorisydämen vaurioitumisen riskiä, mikä on usein johtunut kaapeleiden puutteellisesta erottelusta. [36]

Kaapelipalot voivat alkaa neljällä eri mekanismilla:

1. Kaapelin ylikuumentuminen ylikuormituksesta
2. Kaapelin syttyminen eristeen vaurioitumisesta aiheutuvasta vuotovirrasta tai oi-ko- tai maasulun takia
3. Kaapelin syttyminen ulkoisesta lämpökuormasta
4. Kaapelin syttyminen kaapeliliitoksessa tai –jatkoksessa syntyvän löysän liitoksen ylimenovastuksen kuumentamana

Ylikuormittuessaan kaapeli kuumenee koko matkaltaan, kunnes se syttyy itsestään liian suuren lämpötilan johdosta. Kaapelityypistä riippuen kaapeli syttyy yleensä noin 300 –

400 °C lämpötilassa. Palon kehitys voi olla hyvin nopeaa tai hidasta riippuen ylikuormituksen tasosta. Pienellä ylikuormituksella palo voi aluksi kyteä pitkän aikaa, jolloin paloilmalaisimet ehtivät hälyttää ennen varsinaista syttymistä. Kaapelin syttyminen ylikuormituksesta edellyttää kaapelin virheellistä mitoitus- tai ylivirtasuojien toimimattomuutta. Tilannetta voi pahentaa, jos kaapelin lämmönsiirto ympäristöön on heikentynyt esimerkiksi pölyyntymisen johdosta.

Edellä kuvattu kaapelin ylikuumeneminen tai kaapelin virheellinen mekaaninen käsittely voivat johtaa kaapelin eristeen vaurioitumiseen. Esimerkiksi liian jyrkkä taivutussäde kaapelia asentaessa voi vaurioittaa eristettä. Eristevaurio ei näy välttämättä heti kaapelia koetettaessa ja kuormitettaessa, vaan vasta kaapelin ollessa pitkän aikaa kuormitettuna. Eristeen vaurioitumiskohdassa voi alkaa esiintyä vuotovirtaa tai syntyä oiko- tai maasulku. Kaapeli kuumenee tällöin vaurioitumiskohdassa suuren virrantiheyden ja mahdollisesti syntyvän valokaaren vaikutuksesta. Valokaaren tyypillinen lämpötila on 3000 – 4000 °C, mikä riittää sulattamaan metallitkin [15]. Kuuma valokaari voi sulattaa esimerkiksi kaapelin johtimia tai kaapelihyllyä, jolloin roiskuva sula metalli voi levittää paloa ympäristöön. Valokaarioikosulun syntyminen on mahdollista ilman ylivirtasuojan laukeamista. Kaapelissa pistemäisesti vaikuttavan vuotovirran teho on ainoastaan kymmenien wattien suuruinen.

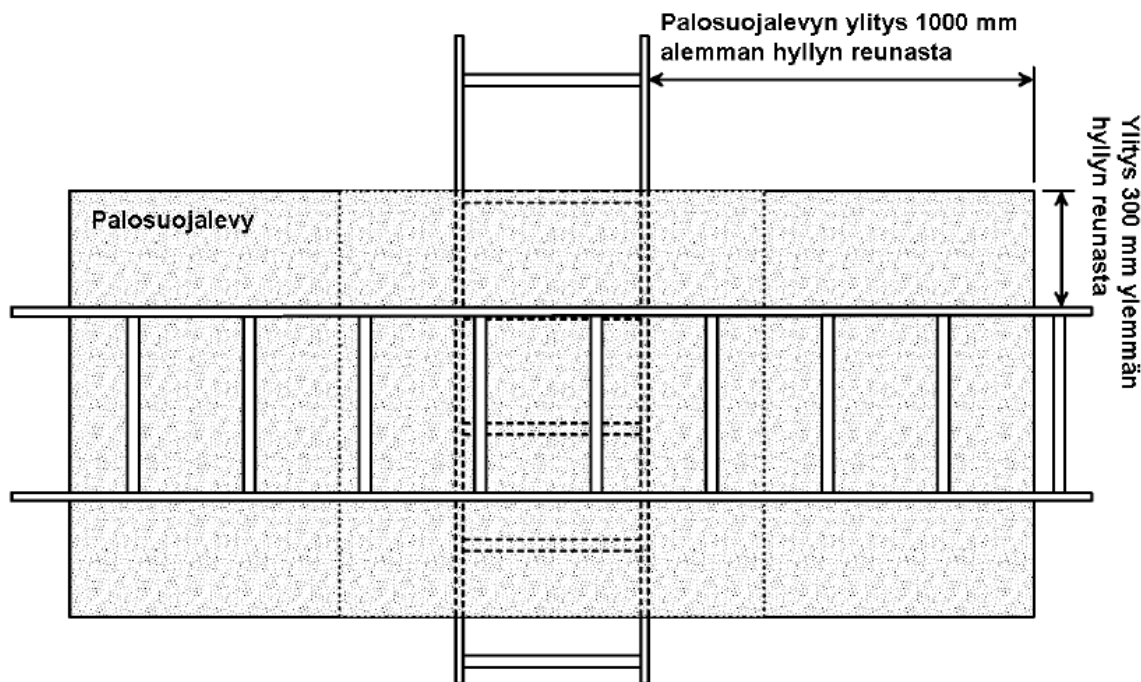
Kaapelin syttyminen ulkoisesta lämpökuormasta voi johtua esimerkiksi kaapeleiden lähellä kulkevasta kuumasta höyryputkesta. Tilanteen ei pitäisi kuitenkaan olla mahdollista suomalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuusluokiteltujen kaapeleiden ollessa kyseessä, koska turvallisuusluokiteltuihin kaapelitiloihin ei tällaisia lämpö- tai palokuormia saa asentaa. Suomessa kiinnitetään lisäksi erityistä huomioita tulitöiden turvalliseen suorittamiseen. [36]

Kaapelijatkoksia ei yleensä käytetä suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla mutta kaapelipalon syttyminen kaapelipäätteen löysän liitoksen takia voi kuitenkin olla mahdollista. Löystynyt liitos aiheuttaa jo normaalikäytössä ylimääristä lämpenemistä. Jos liitokseen kytkeytyvä kuorma menee täydelliseen oikosulkuun, saattaa viallinen liitin olla käytännöllisesti katsoen ainoa virtaa rajoittava tekijä. Tällöin liitin lämpenee voimakkaasti ja voi sytyttää ympäristön.

Kaapelipalojen torjunnassa erityisen tärkeää on kaapeleiden poikkipinnan ja suojalaitteiden oikea mitoitus ylikuormittumisen estämiseksi. Liian kauan jatkuva ylikuormitus tai oiko- tai maasulku voivat sytyttää kaapelin tai sen ympäristön. Tehokas keino laajojen kaapelipalojen välttämiseksi on myös rakenteeltaan ja materiaaleiltaan oikeanlaisten kaapeleiden valitseminen. Ydinvoimalaitoksissa vaaditaan käytettäväksi materiaaleiltaan palojen leviämistä estäviä kaapeleita [37]. Kaapelireitit tulee myös valita siten, että mahdollisuus kaapeleiden vahingoittumiseen tulipalossa tai mekaanisista syistä on pieni. Erityisesti hälytys- ja palontorjuntalaitteiden kaapeleiden tulee olla suojattuja tulipaloilta, jotta palontorjuntajärjestelmien toiminta on turvattu niitä tarvittaessa [36]. Palon

leviäminen voimakaapeleissa voidaan välttää asentamalla kaapelit riittävän etäälle toisistaan. Pienivirtaiset automaatiokaapelit eivät yleensä itsessään syty, jolloin niitä voidaan paloturvallisuuden kannalta huoletta niputtaa yhteen. Automaatiokaapelit voidaan myös peittää tai sulkea palojen leviämisen estämiseksi niihin. Voimakkaasti lämpeneviä voimakaapeleita ei suositella peitettäväksi. [15]

Paikassa, jossa eri divisioonien kaapelihyllyt risteää, voidaan käyttää esimerkiksi kuvan 24 mukaista palosuojalevyä. Palosuojalevy estää tulipalon leviämisen divisioonasta toiseen.



Kuva 24. Esimerkki kaapelihyllyjä erottelevasta palosuojalevystä

5.2.2 Räjähdykset

Räjähdykset voivat uhata kaapeloinnin erottelua suorasti vahingoittamalla useamman redundanssin kaapeleita yhtäaikaaisesti tai epäsuorasti rikkomalla turvallisuuslohkoja erottelevia rakenteita, joka taas voi johtaa esimerkiksi tulipalojen leviämiseen turvallisuuslohkosta toiseen. Kaapeloinnin erottelu voi vaarantua räjähdysten takia erityisesti paikoissa, joissa redundanttisia kaapeleita kulkee tiiviisti. Käytännössä kyseeseen voi tulla kaapeleiden erottelu suojarakennuksessa.

Räjähdysalttiita aineita ei saa pitää lähellä turvallisuusjärjestelmiä mutta esimerkiksi vakavassa reaktorionnettomuudessa saattaa vetyä muodostua polttoaineen suojakuoren kuumentuessa ja hapettuessa. Polttoaineen metallinen suojakuori kaappaa jäähdytteenä toimivasta vedestä hapetta, jolloin jäljelle jää pelkää vetyä, joka voi aiheuttaa vetyräjähdysten kipinän saadessaan.

Vetyräjähdyksiltä suojaudutaan vetyrekombinaattoreilla ja kipinäväleillä, joilla voidaan polttaa vetyä hallitusti pienissä määrissä sekä kiehutusvesilaitoksella pitämällä suojarakennus normaalikäytössä typpitäytteisenä. [38]. Kaapeleiden riittävä erottelu räjähdyksissä pyritään varmistamaan layout-suunnittelulla sekä turvarakennusten kestävyydellä.

5.2.3 Sähkömagneettiset häiriöt

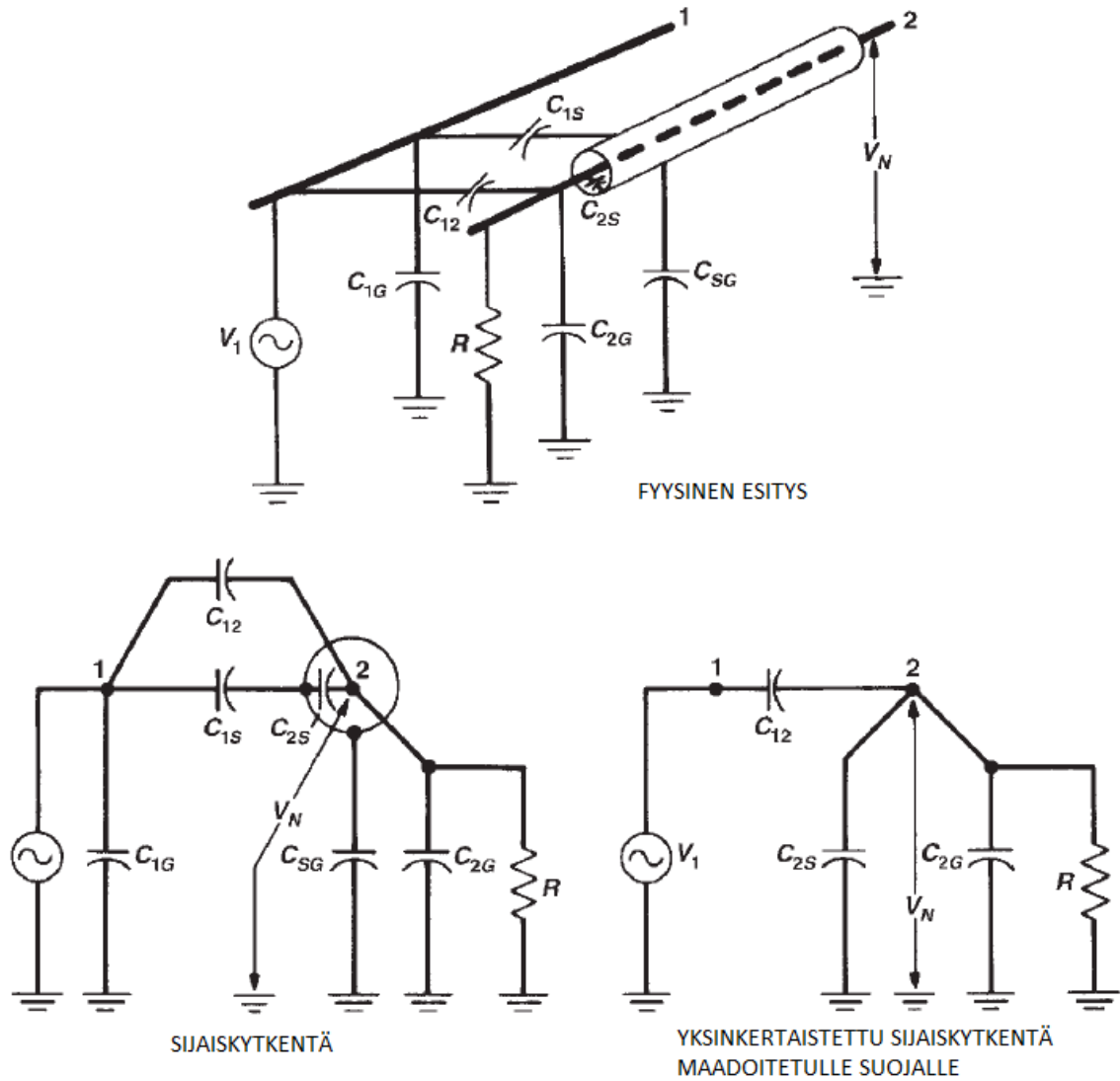
Sähkömagneettisten häiriöiden leviämiseen liittyy aina häiriöketju (kuva 15). Häiriöiden leviäminen estyy, jos mikä tahansa häiriöketjun osa poistetaan. Sähkömagneettisten häiriöiden leviämistä voidaan näin ollen estää kolmella tavalla:

- Rajoitetaan häiriö lähteeseensä.
- Heikennetään häiriön kytkeytymisreittiä.
- Suojataan tai suunnitellaan häiriön vastaanottaja häiriöitä vastaan. [25]

Ydinvoimalaitosten kaapeloinnissa merkittävimpana häiriölähteenä toimivat yleensä voimakaapelit ja niissä esiintyvät korkeat jännitteet ja virrat. Kapasitiivisen ja induktiivisen kytkeytymisen kautta voimakaapeleiden korkea jännite ja virta voi häiritä tai pahimmillaan vahingoittaa herkempiä virtapiirejä vaikka ne eivät olisi keskenään suorassa yhteydessä.

Kapasitiivisesti sähkökentän välityksellä kytkeytyviltä häiriöiltä suojaudutaan etäisyydellä ja sähköisellä suojalla. Kasvattamalla häiriintyvän kaapelin etäisyyttä häiriölähteestä, kuten voimakaapelista, pienenee kaapeleiden välinen hajakapasitanssi ja tätä kautta häiriintyvään kaapeliin indusoituvaa häiriöjännitettä kaavan (5) mukaisesti. Sähköinen suoja on yleensä häiriintyvän kaapelin rakenteessa.

Kaapelin sähköistä suojausta (*shielding*) havainnollistaa kuva 25. Kuvassa häiriintyvän johtimen 2 ympärille on asetettu sähköinen suoja, joka ei aivan kokonaan peitä johdinta päistään, koska usein suojaa ei viedä kytkentöjen takia loppuun asti. Lisäksi johtimella 2 on jokin äärellinen resistanssi maahan nähden ja suoja on maadoitettu, jolloin sijaiskytkentä yksinkertaistuu oikeanpuoleisen kytkennän muotoon. Kuvassa näkyvä johtimen 1 ja 2 välinen keskinäiskapasitanssi C_{12} riippuu nyt lähinnä matkasta, jonka johdin 2 kulkee ilman staattista suojaansa. Termi C_{2S} kuvaa johtimen 2 ja suojan välistä kapasitanssia, C_{2G} johtimen 2 ja maan välistä kapasitanssia, R johtimen 2 ja maan välistä resistanssia ja V_N johtimeen 2 indusoituvaa häiriöjännitettä. Termi V_I kuvaa häiriön lähteenä olevaa johtimen 1 muuttuvaa jännitettä.



Kuva 25. Johtimen suojaaminen staattisella suojalla [23]

Käyttämällä usein käytännössä toimivaa oletusta:

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G} + C_{2S})}, \quad (9)$$

saadaan johtimeen 2 indusoituvaksi häiriöjännitteeksi:

$$V_N = j\omega RC_{12}V_1. \quad (10)$$

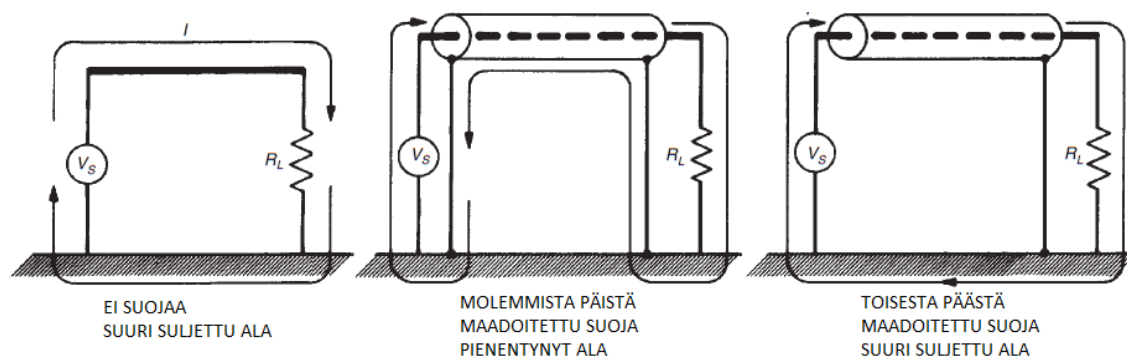
Yhtälö on sama kuin yhtälö (5) aiemmin, joka kuvasi suojaamattomaan johtimeen indusoituvaa häiriöjännitettä. Nyt kuitenkin keskinäiskapasitanssi C_{12} on pienentynyt huomattavasti sähköisen suojan vaikutuksesta.

Induktiivisesti magneettikentän välityksellä kytkeytyviltä häiriöiltä paras suojautumistapa on pienentää häiriön vastaanottavan piirin sulkemaa pinta-alaa, joka riippuu virran kulkureitistä. Toinen tapa on kasvattaa häiriön vastaanottavan piirin etäisyyttä häiriöläh-

teestä, jolloin keskinäisinduktanssi pienenee. Pinta-alaa voidaan pienentää kolmella tavalla:

1. Käyttämällä epämagneettista suojaa, joka maadoitetaan molemmista päistä
2. Sijoittamalla vastaanottava piiri mahdollisimman lähelle maata, jos paluuvirta kulkee maan kautta
3. Käyttämällä kierrettyjä parijohtimia, jos paluuvirta kulkee toisessa parijohtimessa

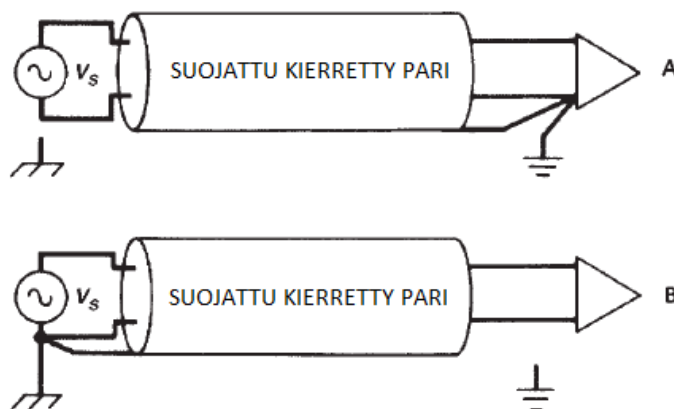
Pinta-alan pienentämistä maadoitetulla suojalla havainnollistaa kuva 26.



Kuva 26. Pinta-alan pienentäminen [23]

Matalilla 50 Hz taajuuksilla epämagneettinen suoja ei kuitenkaan toimi virran paluureitinä vaan maadoitetusta suojasta huolimatta paluuvirta kulkee maan kautta. Häiriön vastaanottavan kaapelin rakenteessa tulee tällöin käyttää kierrettyjä parijohtimia.

Matalilla taajuuksilla EMC-suojaus toteutetaan etäisyydellä sekä häiriön kapasitiivista kytkeytymistä pienentävällä sähköisellä suojalla ja induktiivista kytkeytymistä pienentävällä kierretyllä parijohdinkaapelilla. Matalilla taajuuksilla kaapelin sähköinen suoja maadoitetaan yleensä vain yhdestä päästä. Jos suoja maadoitettaisiin molemmista päistä, maadoituspiirissä vaihtelevat jännitteet saattaisivat aiheuttaa potentiaalieron myös suojan päiden välille, mikä saisi aikaan häiritsevän virran. Tästä syystä suoja suositellaan maadoitettavaksi yleensä vain lähteen (anturi tai teholähde) päässä, koska se toimii signaalin referenssitasona. Toisaalta maadoituspiirin potentiaalierot voidaan estää maadoituspiirin tehokkaalla maadoittamisella. Jos lähdepää ei ole maadoitettu, niin maadoitus kannattaa tehdä kuorman (mittalaite tai sähkökuorma) päässä. Suojatun kierretyn parijohtimen suositellut maadoitustavat on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Suojatun kierretyn parihohtimen suositellut maadoitustavat [23]

Digitaalipiireissä ja korkeilla taajuuksilla, joita esiintyy esimerkiksi ydinvoimalaitoksen neutronivuon mittauksessa, suoja maadoitetaan yleensä molemmista päistä. Toisesta päästä maadoittamaton suoja toimisi korkeilla taajuuksilla tehokkaana antennina radiotaajuisille häiriöille. Molemmista päistä maadoitettuun suojaan siirtyvät häiriöt tulevat maadoituspiiristä. Maadoituspiirissä esiintyvät häiriöt ovat lähinnä 50 Hz taajuusalueella olevia, jolloin ne eivät vaikuta digitaalipiireihin ja ne on helppo suodattaa korkeataajuisesta analogiasignaalista. Lisäksi korkeilla taajuuksilla käytetään usein koaksiaalkaapeleita. Korkea taajuus saa virranahdon vaikutuksesta signaalin kulkemaan koaksiaalkaapelin ulkojohtimen sisäpinnalla ja matalataajuinen häiriö kulkee ulkojohtimen ulkopinnalla, mikä vähentää galvaanista häiriön kytkeytymistä yhteisen impedanssin kautta. [23]

Kaikissa tilanteissa kaapelin rakenteessa oleva EMC-suojaus ei kuitenkaan riitä, jos herkkiä kaapeleita joudutaan viemään lähelle voimakaapeleita. Tällöin voidaan käyttää metalliprofiileja tai –putkia, jotka sulkevat tai ohjaavat sähkömagneettisia kenttiä, estäen häiriöiden pääsemisen herkkiin kaapeleihin. Metallinen suoja voidaan esimerkiksi asentaa kaapelihyllyn pohjalle tai alle, jolloin kyseisen hyllyn kaapelit tulee suojatuksi, kun hylly asennetaan häiritsevien kaapeleiden päälle.

5.2.4 Radioaktiivinen säteily

Ydinvoimalaitosten erityispiirteenä osa kaapeleista tulee suojata myös radioaktiiviselta säteilyltä, jota kohdistuu kaapeleihin ydinreaktorin ja höyrystimien läheisyydessä. Kaapelit pyritään pääsääntöisesti sijoittamaan radioaktiiviselta säteilyltä vapaisiin tiloihin. Osa kaapeleista joudutaan kuitenkin viemään myös säteilyä sisältäviin tiloihin pääasias-
sa erilaisiin instrumentointitarpeisiin. Myös merkittävä määrä moottorikäyttöjä ja niiden kaapeleita sijaitsee säteilyä sisältävissä tiloissa. Tällöin käytetään varta vasten kelpoitettuja LOCA-kaapeleita, joiden täytyy mitoitusikänsä lopussa kestää vielä yksi jäähdytteenmenetysonnettomuus (*Loss Of Coolant Accident*).

Normaalikäytössä LOCA-kaapeleihin kohdistuu hieman radioaktiivista säteilyä ja ympäristön lämpötila ja paine saattaa olla hieman korkeampi kuin muilla kaapeleilla. LOCA-olosuhteissa radioaktiivisen säteilyn määrä sekä ympäristön lämpötila, paine ja ilmankosteus nousevat normaalikäytöstä. Jos LOCA-olosuhteet kestävät pitkään, voidaan katsoa, että vain kaikista kriittisimpien kaapeleiden tulee säilyttää toimintakykynsä. LOCA-kaapeleiden käyttökuntoisuutta valvotaan visuaalisin määräaikaistarkastuksin ja lisäksi määräajoin otettavilla näytteillä, joita varten on sijoitettu näytekaapeleita sopiin kohteisiin.

5.2.5 Mekaaniset uhat

Kaapeleiden eheyttä voivat mekaanisesti uhata esimerkiksi painavat nostokuormat, putkirikot, missiilit ja huolimattomuus asennustoissa. Kaapelin mekaanisesta vaurioitumisesta voi seurata eristeen vaurioituminen, joka voi johtaa sähköisiin vikoihin ja kaapelin syttymiseen. Kaapeleiden mekaaninen suojaus voidaan toteuttaa erilaisilla metalliprofiileilla ja –putkilla. Mekaaninen suojaus pyritään kuitenkin ensisijaisesti välttämään kaapelireittien valinnoilla. [14]

5.2.6 Sisäiset tulvat

Ydinvoimalaitoksen kaapelointia vaarantavat sisäiset tulvat voivat aiheutua suurten jäädyteputkien katkeamisesta tai tulipalojen sammutustoimista. Myös sammutusjärjestelmän aiheuttomaan toimintaan tulee varautua. Hyvin sähköä johtava vesi voi oikosulkea kaapeleita ja sähkölaitteita. Tulvien vaikutuksilta suojaudutaan layout-suunnittelulla ja vuotovesien hallitsemisella esimerkiksi viemäroinnin kautta. [35]

5.3 Ulkoiset uhat

Ulkoiset uhat ovat ydinvoimalaitoksen ympäristössä esiintyviä uhkia, jotka voivat vaikuttaa haitallisesti laitoksen turvallisuuteen tai käyttöön. Kaapeloinnin erottelun kannalta merkittävimmät ulkoiset uhat ovat maanjäristys, salaman iskut, lentokoneen törmäys ja tulva.

5.3.1 Maanjäristys

Ydinvoimalaitoksen rakentamislupahakemuksen yhteydessä tulee määrittää seismiseen suunnitteluun käytettävä suunnittelumaanjäristys, joka määrittää rakenteiden ja laitteiden seismiset vaatimukset. Ohjeen YVL B.2 [10] mukaan ydinvoimalaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet on luokiteltava maanjäristysluokkiin S1, S2A ja S2B. Luokkaan S1 kuuluvien tulee säilyttää toimintakykynsä suunnittelumaanjäristyksessä. Luokan S2A järjestelmien ei tarvitse säilyttää toimintaansa maanjäristyksessä, mutta niillä voi olla sijainnista riippuvia tai muusta syystä aiheutuvia vaikutuksia luokan S1 järjes-

telmiin. Loput järjestelmät, rakenteet ja laitteet kuuluvat luokkaan S2B. Maanjäristyskestävyyden vaatimusmäärittelyllä ja sen toteuttamisella varmistetaan kaapelijärjestelmien kestävyys suunnittelumaanjäristyksen aikana. Vaatimusten toteutuminen todetaan maanjäristystesteillä.

5.3.2 Salamet

Salaman iskut voivat aiheuttaa suuria ylijännitteitä erityisesti sähkönsiirtoverkoissa. Kantaverkosta välittyviltä ylijännitteiltä suojaudutaan esimerkiksi MO-suojilla. Suoraan ydinvoimalaitokseen osuvat salaman iskut johdetaan ukkossuojajärjestelmän kautta turvallisesti maahan.

5.3.3 Lentokoneen törmäys

Ydinvoimalaitoksen vaurioitumisesta aiheutuvat seuraukset yhteiskunnalle voivat olla erittäin suuret, mikä altistaa ydinvoimalaitokset mahdollisen ilkivallan ja jopa terrorismin kohteeksi. Tästä syystä ydinvoimalaitoksen suunnittelussa varaudutaan myös suuren liikennelentokoneen törmäykseen. Ohjeen YVL A.11 [39] mukaan lentokonetörmäys tulee huomioida myös kaapelireittien suunnittelussa. Kaapelireitit riippuvat vahvasti laitoksen layout-suunnittelusta. Lentokonetörmäyksiltä suojaudutaan myös muun muassa rakennusten kestoisuudella törmäystä vastaan.

5.3.4 Ulkoiset tulvat

Ulkoiset tulvat voivat suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla aiheutua mahdollisesti jokien tulvimisesta, poikkeuksellisen korkeasta merivedenpinnasta ja aaltoilusta tai poikkeuksellisesta sadekuurosta [40]. Suomalaiset ydinvoimalaitokset on kuitenkin sijoitettu sellaisille alueille, että ulkoisen tulvan todennäköisyys on erittäin pieni. Fukushima 2011 vuoden ydinvoimalaitosonnettomuudessa tsunami tulvitti kellaritiloissa olleet hätädielselgeneraattorit, mikä johti lopulta yhdessä kantaverkon kaatumisen kanssa ydinvoimalaitoksen sähkönsyötön ja usean reaktorin jäähtymisen menetykseen [41]. Ulkoisilta tulvilta suojaudutaan ydinvoimalaitoksen sijoittamisella alueelle, jossa tulvat ovat epätodennäköisiä. Ydinvoimalaitosalueen tulvittuessa turvallisuusjärjestelmiä suojaavat rakennusten ja järjestelmien sijoittelu ja tulvavesien hallinta. [35]

6. VAATIMUKSET YDINVOIMALAITOSTEN KAAPELOINNIN EROTTTELULLE

Suomalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuutta ja teknistä toteutusta määräävät eritasoiset kansalliset ja kansainväliset vaatimukset. Vaatimusten välinen hierarkia on esitetty kuvassa 28. Mitä alemmaksi hierarkiassa mennään, sitä yksityiskohtaisemmiksi vaatimukset muuttuvat.

Vaatimusten ylimmällä tasolla ovat lait, joista ydinvoimalaitosten turvallisuuden kannalta olennaisin on ydinenenergialaki (990/1987). Seuraavalla tasolla ovat lakeja täsmen-
tävät asetukset ja määräykset. Tärkein näistä on ydinenenergialakia täsmen-
tävä Säteilytur-
vakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta (STUK Y/1/2016). Määräys korvasi vanhan valtioneuvoston asetuksen 717/2013. Kolmannella tasolla ovat YVL-ohjeet, jotka määrittävät käytännössä kaikki suomalaisten ydinvoimalaitosten suunniteluperiaatteet. Viimeisen tason muodostavat teolliset ja kansainväliset standardit, jotka asettavat yksityiskohtaiset vaatimukset järjestelmien ja laitteiden rakenteille ja teknisille ominaisuuksille.



Kuva 28. Suomalaisiin ydinvoimalaitoksiin kohdistuvien vaatimusten hierarkia

Suomalaisten kansallisten vaatimusten soveltaminen käytännön tasolla kaapeloinnin erotteluun on haastavaa, koska suoraan kaapeloinnin erottelua koskevia vaatimuksia on vain vähän. Suurin osa erotteluvaatimuksista täytyy johtaa YVL-ohjeiden varsin yläta-
son vaatimuksista, jotka koskevat syvyys-suuntaista puolustusta sekä sähkö- ja automaa-
tiojärjestelmiä. Tämä jättää runsaasti varaa tulkinnalle erityisesti siitä syystä, että kaape-
lointia voidaan pitää varsin passiivisena ja epätodennäköisesti vikaantuvana järjestel-
mänä.

Oman haasteensa tuo myös kansainvälisten standardien tulkitseminen, koska useasti standardien vaatimustaso ja tausta-ajatukset eroavat YVL-ohjeiden vaatimuksista. Maailmalla suositumpia ovat olleet kaksiredundanttiset ydinvoimalaitokset, joiden turvallisuusjärjestelmiltä vaaditaan yleisesti N+1 –vikakriteerin toteuttamista. Useat kansainväliset standardit perustuvat tähän toimintamalliin. Suomalaiset YVL-ohjeet eivät taas nykyisellään enää edes mahdollista kaksiredundanttisten laitosten rakentamista Suomeen, koska tärkeimpien turvallisuusjärjestelmien tulee toteuttaa N+2 –vikakriteeri. Esimerkiksi rakenteilla oleva OL3 tulee olemaan neliredundanttinen laitos.

Näin ollen kansainvälisiä standardeja tulkittaessa tulee aina huomioida mahdollinen vaatimustason poikkeavuus YVL-ohjeista. Kaikkien standardien vaatimusten noudattaminen kirjaimellisesti ei ole aina mielekästä. YVL-ohjeiden ja standardien vaatimukset ovat osittain myös päällekkäisiä, minkä takia kaapeloinnin erottelun toteutus on aina tapauskohtaisesti mietittävä kokonaisuus. Vaadittu ydinturvallisuuden taso voidaan saavuttaa usealla eri tavalla riippuen mitä vaatimuksia halutaan painottaa.

Seuraavissa kappaleissa esitellään ydinvoimalaitoksen kaapeloinnin erottelua koskevat olennaisimmat kansalliset ja kansainväliset vaatimukset. Kokonaisuuden hahmottamiseksi taulukkoon 4 on koottu eri vaatimusten merkitykset kaapeloinnin erottelulle.

***Taulukko 4.** Eri tasoilta tulevien vaatimusten merkitys kaapeloinnin erottelulle*

Taso		Merkitys
1	Ydinenergialaki	Esittää yleiset vaatimukset ydinenergian käytön pitämiseksi turvallisena ihmisille ja ympäristölle sekä yhteiskunnan edun mukaisena.
2	STUKin määräys	Täsmentää ydinenergialain vaatimuksia.
3	YVL-ohjeet	Asettavat ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. Määrittävät kaapeloinnissa sovellettavat erotteluperiaatteet .
4	Standardit	Määrittävät kaapeloinnin erotteluperiaatteet sekä käytännön tekniset toimenpiteet, kuten fyysiset etäisyydet, joilla erottelu toteutetaan.

6.1 Ydinenergialaki

Ydinenergialain (990/1987) [2] tarkoituksena on varmistaa, että ydinenergian käyttö pysyy yhteiskunnan kokonaisedun mukaisena sekä turvallisena ihmisten ja ympäristön kannalta eikä edistä ydinaseiden leviämistä. Ydinenergialain 6 §:n mukaan ydinenergian käytön on oltava turvallista eikä siitä saa aiheutua vahinkoa ihmisille, ympäristölle tai omaisuudelle.

Tärkeimpänä vaatimuksena laki velvoittaa varmistamaan ydinlaitoksen turvallisuuden peräkkäisillä ja toisistaan riippumattomilla suojauksilla eli syvyysuuntaisen turvallisuusperiaatteen noudattamisella. Turvallisuus on pidettävä niin korkealla tasolla kuin

käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Lisäksi ydinlaitoksen suunnittelussa on varauduttava käyttöhäiriöihin ja onnettomuuksiin. Onnettomuuden todennäköisyyden on oltava sitä pienempi, mitä vakavampi onnettomuuden seuraus voisi olla.

Laki määrää Säteilyturvakeskuksen antamaan tarkemmat määräykset ydinturvallisuuden toteuttamiseksi ydinlaitoksilla. Kyseiset määräykset on esitetty YVL-ohjeissa.

6.2 Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta

Ydinenergialakia täydensi ennen valtioneuvoston asetus 717/2013 [42], joka kumottiin 1.1.2016 alkaen. Asetuksen korvasi Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta (STUK Y/1/2016) [6]. STUKin määräyksen ja kumotun asetuksen vaatimukset ovat lähes identtiset.

STUKin määräys vaatii, että ydinvoimalaitoksen turvallisuustoiminnot on määriteltävä sekä turvallisuustoimintoja suorittavat järjestelmät, rakenteet ja laitteet on turvallisuusluokiteltava. Turvallisuusluokan on toimittava kohteen suunnittelun ja vaatimusten perustana.

Häiriö- ja onnettomuustilanteita varten on oltava ulkoinen ja sisäinen sähkönsyöttöjärjestelmä. Sähkö on voitava syöttää turvallisuustoimintoja varten kumpaakin järjestelmää käyttäen. Reaktorissa olevan polttoaineen ja varastoaltaissa olevan käytetyn polttoaineen jälkilämmön poisto on varmistettava kolmen vuorokauden ajaksi laitoksen ulkoisesta sähköön ja veden syötöstä riippumattomasti tilanteessa, jonka aiheuttaa harvinainen ulkoinen tapahtuma tai laitoksen sisäisen sähköjakelujärjestelmän häiriö. Järjestelmät, jotka osallistuvat vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaan ja etenemisen estämiseen sekä laitoksen tilan seuraamiseen vakavissa reaktorionnettomuuksissa, on oltava riippumattomia laitoksen normaalia käyttöä, odotettavissa olevia käyttöhäiriöitä ja oletettuja onnettomuuksia varten suunnitelluista järjestelmistä.

Suunnittelussa on huomioitava laitoksen sisäiset ja ulkoiset tapahtumat, jotka voivat uhata turvallisuustoimintoja. Järjestelmät, rakenteet, laitteet ja kulkuyhteydet on suunniteltava, sijoitettava ja suojattava siten, että näiden tapahtumien vaikutukset laitoksen turvallisuuteen ovat vähäisiä. Tapahtumia voivat olla esimerkiksi laitoksen sisä- tai ulkopuolella syntyvä tulipalo, putkikatkokot sekä sähkömagneettinen säteily.

6.3 YVL-ohjeet

Ydinenergialain mukaan Säteilyturvakeskuksen tehtävänä on asettaa ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. Vaatimukset on koottu YVL-ohjeisiin. YVL-ohjeissa kerrataan ydinenergialain ja STUKin määräyksen vaatimuksia, joten niitä ei enää tässä uudelleen mainita. Kaape-

loinnin erottelua koskevat vaatimukset esitetään pääasiassa ohjeessa YVL B.1. Erotteluvaatimuksia täydentävät ohjeet YVL E.7, B.7 ja B.8.

6.3.1 YVL B.1 Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu

YVL B.1 Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu on tärkein yksittäinen ohje suomalaisten ydinvoimalaitosten turvallisuustoimintojen ja niitä toteuttavien turvallisuusjärjestelmien suunnittelulle sekä myös kaapeloinnin erottelulle. Kaapeloinnin erottelua koskevat vaatimukset johdetaan YVL B.1:n kappaleiden 4.3.1 ja 4.3.2 vaatimuksista, jotka koskevat syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuutta ja yksittäisten tasojen vahvuutta. Ohjeessa käytetään useasti termiä *turvallisuuslohko*, jolla tarkoitetaan fyysisesti toisistaan eroteltuja tiloja ja niiden sisältämiä laitteita ja rakenteita, joihin sijoitetaan kunkin turvallisuusjärjestelmän yksi moninkertaisuusperiaatetta toteuttava osa.

YVL B.1 täsmentää syvyysuuntaisen puolustuksen toteutusta seuraavasti. Syvyysuuntaisten puolustustasojen on oltava toisistaan niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Riippumattomuus saavutetaan toiminnallisen ja fyysisen erottelun sekä erilaisuusperiaatteen riittävällä soveltamisella puolustustasojen välillä. Yhden puolustustason menetys ei saa heikentää muiden puolustustasojen toimintaa. Eri puolustustasojen järjestelmät on erotettava toisistaan toiminnallisesti niin, että yhdellä tasolla sattuva häiriö tai vikaantuminen ei etene muille tasoille. Lisäksi eri puolustustasojen järjestelmät ja laitteet on erotettava saman turvallisuuslohkon sisällä toisistaan riittävällä etäisyydellä tai suojaavilla rakenteilla, jos on olemassa ilmeinen mahdollisuus seurausvikoihin, jotka aiheutuvat toisella tasolla olevan järjestelmän tai laitteen vikaantumisesta.

Vakavien onnettomuuksien hallintaan (taso 4) tarkoitettut järjestelmät on erotettava toiminnallisesti ja fyysisesti muista järjestelmistä. Vakavien onnettomuuksien hallintaan tarkoitettuja järjestelmiä voi kuitenkin perustellussa tapauksessa käyttää myös vakavien sydänvaurioiden estämiseen oletettujen onnettomuuksien laajennustilanteissa, mikäli tämä ei vaaranna järjestelmien kykyä hoitaa tehtäväänsä vakavassa reaktorionnettomuudessa.

Puolustustasojen on oltava niin vahvoja, että mikään yksittäisen toiminnassa olevan laitteen vikaantuminen tai virhetoiminto normaalikäytön aikana ei johda oletettujen onnettomuuksien hallintaan suunniteltujen järjestelmien käyttöön. Vikaantumisia varten turvallisuusjärjestelmien on koostuttava kahdesta tai useammasta moninkertaisuusperiaatetta toteuttavasta rinnakkaisesta järjestelmästä tai järjestelmän osasta niin, että turvallisuustoiminto voidaan toteuttaa, vaikka mikä tahansa näistä olisi käyttökunnon. Turvallisuusjärjestelmien on toteutettava N+2 tai N+1 –vikakriteeri, kuten ohje esittää.

Turvallisuusjärjestelmien moninkertaisuusperiaatetta toteuttavat osat on sijoitettava eri turvallisuuslohkoihin. Turvallisuusjärjestelmän yhden osajärjestelmän vikaantuminen ei saa estää toisen saman turvallisuusjärjestelmän osajärjestelmää tai minkään samaan turvallisuustoimintoon osallistuvaa muuta järjestelmää toteuttamasta turvallisuustoimintaan. Yhden turvallisuuslohkon tuhoutuminen ei saa johtaa turvallisuustoiminnon menetykseen. Turvallisuuslohkojen on sijaittava eri rakennuksissa tai ne on erotettava muista samassa rakennuksessa olevista turvallisuuslohkoista omiksi osastoikseen siten, että viat eivät voi levitä rinnakkaisesta osajärjestelmästä toiseen laitoksen sisäisten tai ulkoisten tapahtumien seurauksena. Rinnakkaisten osajärjestelmien erotteluvaatimus koskee myös kaikkia tukijärjestelmiä ja ohjaavia automaatiojärjestelmiä aina turvallisuustoiminnon käynnistystarpeen osoittavasta mittauksesta turvallisuustoiminnon toteuttaville laitteille asti. Jos sähkö- tai ohjauskaapeleita kytketään ristiin rinnakkaisten osajärjestelmien välillä, on ratkaisun oltava turvallisuuden kannalta parempi kuin ilman ristiinkytkentöjä.

Eri turvallisuusluokkien järjestelmät ja laitteet on erotettava toisistaan toiminnallisesti siten, että alemman turvallisuusluokan järjestelmän, rakenteen tai laitteen toiminta tai vikaantuminen ei aiheuta ylemmän turvallisuusluokan osien vikaantumista tai toiminnan menetystä. Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) on huomioitava sähkölaitteiden ja kaapelien sijoittelussa.

Alemman turvallisuusluokan automaatiojärjestelmän vikaantuminen ei saa estää turvallisuusluokan 2 suojausjärjestelmää toteuttamasta turvallisuustoimintoja. Turvallisuusluokan EYT automaatiojärjestelmät eivät saa vikaantuessaan aiheuttaa käyttöhäiriötä pahempaa alkutapahtumaa eikä estää onnettomuuksissa tarvittavien turvallisuusjärjestelmien toimimista. Turvallisuusluokan 3 käyttöautomaation vikaantuminen ei saa estää onnettomuuksia varten suunniteltujen turvallisuustoimintojen toteutumisesta eikä onnettomuuden yhteydessä olennaisesti huonontaa laitoksen tilaa. Vakavien onnettomuuksien hallintaan käytettävän instrumentoinnin ja ohjausjärjestelmien on oltava riippumattomia laitoksen muista automaatiojärjestelmistä. Muiden automaatiojärjestelmien vikaantuminen ei saa häiritä vakavien onnettomuuksien hallintatoimenpiteitä.

Ydinvoimalaitoksessa on oltava valvomo ja siitä riippumaton varavalvomo. Ohjaus- ja säätöjärjestelmien sekä suojausautomaation moninkertaisuusperiaatetta toteuttavat osat on erotettava toisistaan toiminnallisesti valvomon sisällä. Valvomon ja varavalvomon ohjausten keskinäinen riippumattomuus on toteutettava käyttäen fyysistä ja toiminnallista erottelua. Minkään palo-osaston tuhoutuminen ei saa aiheuttaa sekä valvomon että varavalvomon ohjausten menettämistä.

Laitoksen ulkoiset ja sisäiset sähkötehon syöttölähteet on suunniteltava siten, että yksittäisen syöttölähteen menetyksestä seuraava tai samasta syystä aiheutuva jäljelle jääneiden syöttölähteiden menetys on erittäin epätodennäköistä. Turvallisuusluokiteltujen sähköjärjestelmien moninkertaisuusperiaatetta toteuttavien osien välisiä ristiinkytkentöjä on vältettävä, ellei voida osoittaa, että ne parantavat järjestelmän luotettavuutta. Yh-

den moninkertaisuusperiaatetta toteuttavan sähköjärjestelmän osan vian leviäminen riskiintymiskennän kautta toiseen osaan on estettävä luotettavasti. Vakavien onnettomuuksien hallintaan tarvittavan sähkönsyötön on oltava riippumattoman yksikön muista syöttölähteistä ja jakelujärjestelmistä. Turvallisuusluokitellut sähkö- ja automaatiojärjestelmät, -laitteet sekä niiden kaapeloinnit ja asennukset on suojattava luotettavasti sähkömagneettisilta häiriöiltä. Sähkölaitteet ja niiden kaapeloinnit eivät myöskään saa itse aiheuttaa haitallisia sähkömagneettisia häiriöitä toimintaympäristöönsä. [3]

6.3.2 YVL E.7 Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet

Ohjeessa YVL E.7 Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet esitetään yksityiskohtaiset vaatimukset sähkö- ja automaatiolaitteille sekä kaapeleille. Ohje velvoittaa ottamaan huomioon ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteiden sekä kaapeleiden suunnittelussa, valmistuksessa ja asennuksessa myös muiden viranomaisten kuin STUKin antamat määräykset. Tällaisia määräyksiä ovat esimerkiksi sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat turvallisuusstandardit ja ohjeet, kuten standardisarja SFS 6000: Pienjännitesähköasennukset sekä standardit SFS 6001: Suurjänniteasennukset ja SFS 6002: Sähkötyöturvallisuus. Näiden määräysten noudattamista valvovat asianomaiset viranomaiset.

Turvallisuusluokan 2 ja osan turvallisuusluokan 3 sähkölaitteiden ja kaapeleiden suunnittelun, valmistuksen ja testauksen on perustuttava suomalaisiin tai kansainvälisiin sähkölaitestandardeihin sekä soveltuvin osin ydinteknisiin standardeihin ja ohjeisiin. Loppujen turvallisuusluokan 3 sähkölaitteiden ja kaapeleiden on täytettävä suomalaiset tai kansainväliset sähkölaitestandardit. [43]

6.3.3 YVL B.7 Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa

YVL-ohje B.7 Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa esittää vaatimukset ydinvoimalaitoksen sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutusten torjumiseksi. Ydinvoimalaitoksen suunnittelussa huomioitavia sisäisiä ja ulkoisia uhkia ovat esimerkiksi tulipalot, räjähdykset, tulvat, valokaaret ja sähkömagneettiset häiriöt. Sisäisiä ja ulkoisia uhkia torjutaan ydinvoimalaitoksella tila- ja sijoitussuunnittelulla, moninkertaisuus-, erottelu- ja erilaisuusperiaatteiden soveltamisella, laitteiden ja rakenteiden lujuusteknisellä mitoituksella sekä laitteiden olosuhdekelpoistuksella.

Turvallisuuslohkojen välisille rakenteille ja muille erotteluun käytettäville rakenteille sekä etäisyyteen perustuvalla erottelulla asetettavat teknilliset vaatimukset on määriteltävä tarkasteltavan sisäisen tai ulkoisen uhan sekä RakMK:n ja sovellettavien standardien perusteella. Jos turvallisuuslohkoja ei voida rakentaa erillisiksi osastoiksi, kuten suojarakennuksessa, valvomossa ja sen alapuolisissa kaapelitiloissa, on turvallisuuslohkot

eroteltava toisistaan osittain erottelevilla rakenteilla tai riittävällä etäisyydellä huomioiden palontorjunnan syvyyspuolustus (YVL B.8). Jos turvallisuuslohkon kautta on välttämätöntä viedä kaapeleita, jotka eivät toiminnallisesti liity turvallisuuslohkon järjestelmiin, kaapelit on sijoitettava kaapelikanaviin, jotka täyttävät turvallisuuslohkojen välistä erottelua koskevat vaatimukset. [35]

6.3.4 YVL B.8 Ydinlaitoksen palontorjunta

Ydinvoimalaitoksen palontorjunnan vaatimukset esitetään ohjeessa YVL B.8 Ydinlaitoksen palontorjunta. Ydinvoimalaitoksen palontorjunnan suunnittelun lähtökohtana on vaatimus, jonka mukaan ydinvoimalaitos täytyy voida saattaa turvalliseen tilaan ja radioaktiivisten aineiden pääsy ympäristöön estyä, missä tahansa mahdolliseksi arvioidussa palotilanteessa. Palontorjunnan syvyyspuolustuksen tavoitteena on:

1. Estää palon syttyminen.
2. Havaita ja sammuttaa palo nopeasti.
3. Estää palon kehittyminen ja leviäminen.
4. Rajoittaa palon vaikutukset siten, että turvallisuustoiminnot voidaan toteuttaa luotettavasti palon vaikutuksista huolimatta.

Tulipaloissa on pääsääntöisesti oletettava kaikkien palo-osastossa olevien laitteiden vikaantuminen. Vikakriteerien kannalta palon vaikutukset voidaan katsoa rajoittuvan yhden palo-osaston alueelle.

Palo-osastoinnin on perustuttava kerros- ja käyttötapaosastointiin. Käyttötavaltaan poikkeavat tilat, kuten valvomo, tietokonetilat, sähkö- ja kytkintilat, kaapelitilat ja akkuhuoneet on muodostettava erillisiksi palo-osastoiksi. Kaapeliläpivientien on täytettävä lävistetyn osastoivan rakennusosan tiiveys- ja eristävyysvaatimukset EI (E = tiiviys, I = eristävyys).

Suojarakennuksen sisäpuolella oleva palokuorma pitää olla mahdollisimman pieni. Turvallisuusjärjestelmien kaapelit on sijoitettava ja suojattava siten, että mahdollisen palon vaikutus rajoittuu vain yhteen turvallisuuslohkoon.

Valvomoon tulevat turvallisuuden kannalta tärkeät eri turvallisuuslohkojen kaapelit on eroteltava omiin palo-osastoihin. Tilarajoituksen vaatiessa kaapeleiden sijoittamista samaan palo-osastoon, tulee kaapelit erotella tilan sisällä käyttäen etäisyyttä, palonkestäviä rakenteita ja eristämistä, ja palo-osasto tulee lisäksi varustaa tehokkailla ja luotettavilla paloilmoitin- ja sammutusjärjestelmillä. Myös suuria kaapelikeskittymiä sisältävät kaapelitilat, joiden palokuorma on yli 1200 MJ/m^2 , on varustettava sammutusjärjestelmillä, ellei palontorjunnan syvyyspuolustusperiaatteella voida osoittaa, että jatkuvan kaapelipalon kehittyminen tiloissa on hyvin epätodennäköistä. [44]

6.4 IAEA

Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA laatii kansainvälisiä ydinturvallisuusstandardeja, joiden tehtävänä on toimia perustana kansallisten vaatimusten muodostamiselle. Jokainen ydinenenergiaa käyttävä valtio on IAEA:n jäsen ja tätä kautta sitoutunut noudattamaan IAEA:n asettamaa ydinturvallisuustasoa. Maiden kansalliset käytännöt voivat poiketa jonkin verran IAEA:n standardien vaatimuksista, mutta jos ratkaisu poikkeaa merkittävästä IAEA:n asettamista käytännöistä, voi olla syytä pohtia, onko poikkeukselle järkevät perusteet.

IAEA:n standardit perustuvat Yhdysvalloissa suosittuun kaksiredundanttiseen ydinvoimalaitokseen. Standardeja ei voi tästä syystä tulkita kaikissa tapauksissa kirjaimellisesti suomalaiselle (neliredundanttiselle) laitokselle. Standardit käsittävät turvallisuusjärjestelmällä (*safety system*) järjestelmät, jotka ovat tärkeitä turvallisuudelle, ja jotka varmistavat turvallisen reaktorin sammuttamisen tai jälkilämmön poistamisen reaktorisydäimestä tai rajoittavat odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden ja oletettujen onnettomuuksien seurauksia.

6.4.1 IAEA SSR-2/1

Standardissa SSR-2/1 Safety of Nuclear Power Plants: Design annetaan yleiset suunnitteluvaatimukset muun muassa syvyys-suuntaisen puolustuksen toteuttamiseksi. Standardin sisältö vastaa jokseenkin ohjetta YVL B.1.

Standardin mukaan syvyys-suuntaisen puolustuksen tasojen tulee olla niin itsenäisiä kuin käytännöllisin tavoin on saavutettavissa. Tällä estetään toisten tasojen heikentyminen, jos yksi taso vikaantuu. Erityisesti turvallisuustoiminnot ja niitä toteuttavat turvallisuusjärjestelmät, joita tarvitaan oletettujen onnettomuuksien laajennuksissa (erityisesti polttoaineen sulamisen ehkäisemiseen), tulee olla mahdollisimman itsenäisiä. IAEA:n termistössä oletettujen onnettomuuksien laajennukset sisältävät myös vakavat onnettomuudet.

Turvallisuusjärjestelmien ja niiden rinnakkaisten osajärjestelmien välinen häirintä estetään esimerkiksi riittävällä:

1. Fyysisellä erottelulla
2. Sähköisellä eristämällä
3. Toiminnallisella itsenäisyydellä
4. Kommunikaation (tiedonsiirron) itsenäisyydellä

Turvallisuuden kannalta tärkeät komponentit tulee suunnitella ja sijoittaa huomioiden muut turvallisuusjärjestelyt sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutusten kestämiseksi. Suunnittelussa, sijoittelussa ja suojauksessa tulee huomioida myös uhkien aiheuttamat yhteisviat. Mahdollisten yhteisvikojen vaikutukset tulee huomioida erilaisuus- ja rin-

nakkaisperiaatteiden, fyysisen erottelun ja toiminnallisen itsenäisyyden sisällyttämisessä turvallisuudelle tärkeiden komponenttien suunnittelussa.

Jokaisen turvallisuusryhmän tulee täyttää yksittäisvikakriteeri (N+1 –vikakriteeri). Turvallisuusryhmä tarkoittaa komponenttien muodostamia järjestelmiä, jotka on suunniteltu suorittamaan kaikki toimenpiteet, joita tarvitaan tietyn alkutapahtuman hallintaan. Toimenpiteillä varmistetaan laitoksen parametrien säilyminen suunnitteluperusteena määrätyissä rajoissa odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä ja suunnittelun perustana olevissa onnettomuuksissa.

Tukijärjestelmien luotettavuuden, redundanttisuuden, erilaisuuden ja itsenäisyyden tulee vastata varsinaisen turvallisuusjärjestelmän vaatimuksia. Tukijärjestelmän vikaantuminen ei saa yhtäaikaaisesti vaikuttaa turvallisuusjärjestelmän redundanttisiin osiin tai järjestelmään joka suorittaa diverssiä turvallisuustoimintoa ja tällä tavoin mahdollisesti estää näiden järjestelmien turvallisuustoimintojen täyttyminen. [4]

6.4.2 IAEA SSG-34

Kaapeloinnin erotteluun kohdistuvia vaatimuksia asetetaan erityisesti standardissa SSG-34 Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants. Standardin mukaan seuraavat kaapelit tulee erotella fyysisesti toisistaan:

- Turvallisuusluokitellut ja -luokittelemattomat kaapelit
- Eri divisiooniin kuuluvat kaapelit
- Eri jänniteluokkien kaapelit

Turvallisuusluokitteluun perustuvan erottelun tarkoituksena on estää turvallisuusluokiteltujen kaapeleiden vikaantuminen turvallisuusluokittelemattomien järjestelmien tai kaapeleiden vikaantuessa. Erottelemalla eri divisioonien väliset kaapelit, rajoitetaan yksittäisen uhan (esim. tulipalo) vaikutukset vain yhteen divisioonaan. Jänniteluokkien välisellä erottelulla vältetään suurempi energisemmissä piireissä oletettavasti esiintyvien sähkömagneettisten häiriöiden vaikuttaminen pienempi energisiin piireihin. Fyysistä erottelua tulee toteuttaa seuraavien jänniteluokkien välillä:

- Instrumentointi- ja ohjauskaapelit
- Pienjännitteiset voimakaapelit ($U < 1 \text{ kV}$)
- Keskijännitteiset voimakaapelit ($1 \text{ kV} < U < 35 \text{ kV}$)
- Suurjännitteiset voimakaapelit ($U > 35 \text{ kV}$)

Vain saman jänniteluokan kaapeleita saa asettaa samalle kaapelikanavalle (*raceway*). Kaapelikanavan voi muodostaa esimerkiksi kaapelitikkaat, -hyllyt tai putket. Eri jänniteluokkien kaapelit ja kaapelikanavat tulee erotella luokkien mukaisesti etäisyydellä tai fyysisillä suojilla, jotka estävät haitalliset vaikutukset kaapeleiden välillä. Maadoitettu metallinen putki on eräs hyväksyttävä erottelusuoja. Kaapeliläpivientien tulisi noudattaa samoja kaapeloinnin erotteluperiaatteita. Turvallisuusluokiteltuja kaapelikanavia ei pidä

sijoittaa lähelle rakennusten ulkoseiniä häiriöjännitteiden indusoitumisen estämiseksi. Kaapelijatkoksia tulee välttää.

Sähköjärjestelmien ja komponenttien suunnittelussa tulee huomioida seuraavat sähkömagneettiset häiriöt:

- Sähkömagneettisten häiriöiden emissio ja vastaanottaminen säteilemällä
- Sähkömagneettisten häiriöiden emissio ja johtuminen kaapeleiden välityksellä
- Sähköstaattinen purkaus
- Kytkeäntänsientit ja syöksyaallot
- Langattomien järjestelmien ja laitteiden lähettämät sähkömagneettiset aallot

Järjestelmät, laitteet ja kaapelit tulee suunnitella ja asentaa siten, että säteilevien ja johtuvien sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen estetään. Instrumentointikaapeleiden tulisi olla kierrettyjä ja suojalla varustettuja sähkömagneettisten ja sähköstaattisten häiriöiden ehkäisemiseksi. Sähkömagneettisten häiriöiden syntymistä ja kytkeytymistä estetään seuraavilla tekniikoilla:

- Rajoitetaan sähkömagneettiset häiriöt lähteeseensä.
- Erotellaan ja eristetään instrumentointi- ja ohjausjärjestelmien signaalikaapelit voimakkaapeleista.
- Suojataan laitteet, kaapelit ja niiden varusteet ulkoisilta magneetti- ja sähkömagneettikenttien lähteiltä.
- Suodatetaan sähkömagneettiset häiriöt ennen kuin ne kytkeytyvät herkkiin elektronisiin piireihin.
- Neutralisoidaan maapotentiaalierot tai eristetään elektroniset laitteet maapotentiaalista.
- Maadoitetaan sähköiset laitteet, kaapelikanavat, kojeistot, komponentit ja kaapelisuoja (esim. konsentrinen suoja).

Valmiudessa olevien teholahteiden tulee olla riippumattomia muiden divisioonien sähkönsyötöstä. Instrumentointi- ja ohjausjärjestelmiä, jotka käynnistävät, kytkevät, ajavat ja suojaavat valmiudessa olevia teholahteita, tulee syöttää saman divisioonan akustoista. Turvallisuusluokittelemattomat laitteet tulee kytkeä automaattisesti irti onnettomuussignaalista. Valmiudessa olevien teholahteiden tukijärjestelmien (esim. ilmastointi- ja voitelujärjestelmät) tulee saada sähkönsyöttönsä samasta divisioonasta redundanttisuuden ja riippumattomuuden varmistamiseksi. Sellaista yksittäistä haavoittuvaa kohtaa ei saa olla, joka sääilmion, muun ulkoisen tapahtuman tai yksittäisen vian seurauksena, aiheuttaisi yhdenkään valmiudessa olevan teholahteen ja yhtäaikaaisesti kaikkien ulkoisten teholahteiden ja vaihtoehtoisten vaihtosähköteholahteiden menettämiseen. Vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaan tarvittavia laitteita tulee pystyä syöttämään mistä tahansa teholahteesta. [45]

6.4.3 IAEA SSG-39

Standardissa SSG-39 Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants esitetään vaatimuksia instrumentointi- ja ohjausjärjestelmille. Standardin mukaan turvallisuusjärjestelmien tulee olla itsenäisiä järjestelmistä, jotka kuuluvat alempaan turvallisuusluokkaan. Turvallisuusjärjestelmän eri divisioonissa olevien osajärjestelmien tulee olla niin itsenäisiä kuin tarve vaatii, jotta kaikkien turvallisuustoimintojen suorittaminen on varmistettu kaikissa tilanteissa. Jos redundanttisten osajärjestelmien välillä tarvitaan kommunikaatiota esimerkiksi suojausautomaation äänestykseen, tulee kommunikaatiossa varmistua riittävästä sähköisestä ja fyysisestä erottelusta sekä itsenäisyydestä. Tiedonsiirto turvallisuusjärjestelmien ja alemman turvallisuusluokan järjestelmien kanssa tulee järjestää niin, ettei alemman turvallisuusluokan järjestelmien häiriöt estä yhdenkään niihin liittyvää turvallisuusjärjestelmää suorittamasta sen turvallisuustoimintoa. Perustellussa tapauksessa alemman turvallisuusluokan järjestelmästä voidaan lähettää signaaleja ylemmän turvallisuusluokan järjestelmiin, jos voidaan osoittaa, ettei tämä estä ylemmän turvallisuusluokan järjestelmää toteuttamasta turvallisuustoimintoaan.

Automaatioturvallisuusjärjestelmän tukijärjestelmän häiriö tai viallinen toiminta ei saa vaarantaa redundanttisten osajärjestelmien, turvallisuusjärjestelmien ja alemman turvallisuusluokan järjestelmien tai syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen välistä itsenäisyyttä. Turvallisuusryhmien redundanttiset osat tulee erotella toisistaan fyysisesti. Redundanttisten osien täydellinen fyysinen erottelu voi olla epäkäytännöllistä, kun antureita tai toimilaitteita sijoitetaan lähekkäin, kuten säätösauvajärjestelmässä tai paineastian sisäisessä instrumentaatioissa. Kun riittävää fyysistä erottelua ei ole mahdollista tehdä, tulee erottelu tehdä niin hyvin kuin käytännöllisesti katsoen on mahdollista. Turvallisuusjärjestelmien ja niiden komponenttien tulee olla sähköisesti eroteltuja järjestelmistä ja komponenteista, jotka kuuluvat alempaan turvallisuusluokkaan. Turvallisuusryhmien redundanttiset osat tulee erotella toisistaan sähköisesti. [46]

6.5 IEEE

IEEE on maailman suurin tekniikan alan organisaatio, joka edistää teknologian kehitystä ihmiskunnan hyväksi. IEEE:llä on yli 420 000 jäsentä yli 160 maassa. IEEE:n toimintaan kuuluvat erilaisten korkeatasoisten julkaisujen tekeminen, teknologisten standardien laatiminen, konferenssit sekä muut ammatilliset ja opetukselliset aktiviteetit. IEEE on maailman johtava kansainvälisten telekommunikaation, tietotekniikan ja voimantuotantotekniikan standardien laatija. Standardeihin lukeutuvat myös useat ydintekniset standardit. IEEE on hyvin yhdysvaltalaisistaustainen organisaatio, mistä syystä sen ydintekniset standardit perustuvat kaksiredundanttiseen ydinvoimalaitokseen.

IEEE:n standardit käsittelevät pääasiassa luokan 1E kaapeleita ja niiden erottelua. Luokka 1E on turvallisuusluokka, johon kuuluvat sähköiset laitteet tai järjestelmät, jot-

ka ovat välttämättömiä reaktorin sammuttamiseksi, suojarakennuksen eristämiseksi, jälkilämmön poistamiseksi tai jotka muulla tavalla estävät merkittävät radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön. Standardien termillä itsenäisyys tarkoitetaan tilaa, jossa mikään mekanismi, jonka mikä tahansa oletettu tapahtuma, kuten tulva, ei pysty johtamaan redundanttisten osien käyttökunnottomuuteen.

6.5.1 IEEE 690-2004

Standardi IEEE 690-2004 Standard for the Design and Installation of Cable Systems for Class 1E Circuits in Nuclear Power Generating Stations jakaa ydinvoimalaitoksen kaapelit seuraaviin jänniteluokkiin:

- Keskijännitteiset voimakaapelit ($2001 \text{ V} < U < 15000 \text{ V}$)
- Pienjännitteiset voimakaapelit ($U < 2000 \text{ V}$)
- Ohjauskaapelit
- Instrumentointi- ja erikoiskaapelit (esim. koaksiaalikaapelit ja valokuidut)

Kaikkien kaapeleiden tulee läpäistä standardin IEEE 1202 mukainen tulipalotesti. Poikkeuksena kojeistojohdotuksen sekä koaksiaali-, twinaksiaali- ja triaksiaalikaapeleiden tulee läpäistä vähintään UL VW-1 tulipalotesti. Toisin sanoen kaikkien kaapeleiden tulee olla materiaaleiltaan ja rakenteeltaan tulipalon leviämisen estäviä.

Päällekkäiset kaapelihyllyt tulee asentaa ylhäältä alaspäin jänniteluokan mukaan pienevässä järjestyksessä suurin jänniteluokka ylimpänä. Jänniteluokat tulee erottaa toisistaan seuraavien vaatimusten mukaisesti:

- Keskijännitekaapelit asennetaan niin, ettei keskijännite pääse vaikuttamaan kaapelieristeen tai –suojan pettäessä yhteenkään pienemmän jännitteen järjestelmään.
- Keskijännitekaapelit tulee suunnitella ja asentaa siten, ettei niiden sähkö- ja magneetikentät pääse vaikuttamaan yhteenkään pienemmän jännitteen järjestelmään ja että keskinäisinduktanssin kautta kytkeytyminen minimoidaan.
- Instrumentointikaapelit asennetaan niin, että niiden poimimat häiriöt minimoituu läheisistä piireistä ja laitteista.

Tarkempien erotteluvaatimusten suhteen viitataan standardiin IEEE 384.

Nimellisjännitteeltään yli 5 kV kaapelit tulee varustaa sähköisellä suojalla, ellei tehdä poikkeusta erityissovellusta varten. Kosketussuojalla varustetut ($> 5 \text{ kV}$) kaapelit tulee päättää soveltuvilla materiaaleilla mukaan lukien jänniterasituksia hallitsevat komponentit, jotka eivät vaaranna sähköisen suojan tai eristyksen yhtenäisyyttä. Sähköiset suojat ja metalliset armeeraukset tulee maadoittaa kiinteästi yhdestä tai useammasta kohdasta, jotta suojat toimivat lähellä maapotentiaalia. Suojien lämpeneminen indusoituvista virroista tulee huomioida kaapelin kuormitettavuuden määrittämisessä.

Instrumentointikaapeleiden sähköinen suoja tulee olla sähköisesti jatkuva ellei toisin vaadita. Jokaisen kaapelin suojan tulee olla eristetty maapotentiaalin vaihtelun ja useamman maapotentiaalin syntymisen estämiseksi. Suojaa ei saa käyttää sähköisenä johtimena vaihe tai maadoitus tarkoituksiin, jos se on suunniteltu pelkästään sähköstaattisen tai sähkömagneettisen kytkeytymisen estämiseksi. [33]

6.5.2 IEEE 384-2008

Standardissa IEEE 384-2008 Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits esitetään vaatimukset luokan 1E kaapeleiden erottelulle. Standardin mukaisella fyysisellä erottelulla ja sähköisellä eristämällä varmistetaan luokan 1E järjestelmien piirien ja laitteiden itsenäisyys, jotta vaaditut turvallisuustoiminnot voidaan suorittaa kaikkien oletettujen onnettomuuksien aikana ja jälkeen.

Fyysinen erottelu toteutetaan turvallisuusluokitelluilla rakenteilla, erotteluetaisyydellä tai -esteillä tai näiden yhdistelmillä. Sähköinen eristäminen saavutetaan erotteluetaisyydellä, erotuslaitteilla, suojilla ja kaapelointitekniikoilla tai näiden yhdistelmillä.

Luokan 1E piirien ja laitteiden itsenäisyys ei saa riippua tukijärjestelmien toiminnan häiriintymisestä. Esimerkiksi luokan 1E kojeistotilan ilmastoinnista huolehtivan järjestelmän tulee sijaita samassa divisioonassa. Tällä vältetään, ettei mekaanisen toiminnon menetys yhdessä divisioonassa johda samanaikaisesti toisen divisioonan sähköisen toiminnan menetykseen.

Luokkaan 1E kuulumattomista voima-, ohjaus-, ja instrumentointipiireistä tulee liittyviä piirejä (*associated circuits*), jos yksi tai useampi seuraavista kohdista toteutuu:

- a) Suora yhteys luokan 1E tehollähteeseen ilman eristyslaitetta
- b) Suora yhteys luokkaan 1E liittyvään tehollähteeseen (*associated power supply*) ilman eristyslaitetta
- c) Piirit ovat luokan 1E piirien tai laitteiden läheisyydessä ilman vaadittua fyysistä etäisyyttä tai esteitä
- d) Piirit ovat liittyvien piirien tai laitteiden läheisyydessä ilman vaadittua fyysistä etäisyyttä tai esteitä
- e) Piirit jakavat luokan 1E tai luokkaan 1E liittyvän signaalin (*associated signal*) ilman eristyslaitetta

Liittyvien piirien tulee täyttää yksi seuraavista vaatimuksista:

- a) Liittyvät piirit tulee identifioida liittyviksi piireiksi tai luokan 1E piireiksi ja niiden tulee pysyä samassa divisioonassa tai olla samalla tavalla fyysisesti eroteltu- ja kuin ne luokan 1E piirit, joihin ne liittyvät. Liittyviin piireihin kohdistuu samat vaatimukset kuin luokan 1E piireihin, joihin ne liittyvät, ellei voida osoittaa, että näiden vaatimusten toteuttamatta jättäminen ei heikennä luokan 1E piirien toimintaa alle hyväksyttävän tason.

- b) Liittyvät piirit pysyvät liittyvinä piireinä aina eristyslaitteeseen asti, ellei piiristä tämän jälkeen tule uudestaan liittyvä piiri.
- c) Liittyvät piirit tulee analysoida tai testata ja tätä kautta osoittaa, että ne eivät heikennä luokan 1E piirien toimintaa alle hyväksyttävän tason. Nämä liittyvät piirit voidaan tämän jälkeen luokitella luokkaan 1E kuulumattomiksi piireiksi.

Kantaverkosta tai päägeneraattorilta tulevat piirit ovat poikkeus ja niitä ei tarvitse luokitella liittyviksi piireiksi.

Luokkaan 1E kuulumattomien piirien itsenäisyys luokan 1E piireistä tai liittyvistä piireistä saavutetaan täyttämällä seuraavat vaatimukset:

- a) Luokkaan 1E kuulumattomat piirit tulee olla fyysisesti eroteltuja riittävällä etäisyydellä luokan 1E piireistä ja liittyvistä piireistä. Kohdissa c), d) ja e) esitetään sallitut poikkeukset tästä. Jos mikään näistä vaatimuksista ei täyty, tulee luokkaan 1E kuulumattomasta piiristä liittyvä piiri.
- b) Luokkaan 1E kuulumattomat piirit tulee olla sähköisesti eristettyjä luokan 1E piireistä ja liittyvistä piireistä. Sähköinen eristys saavutetaan eristyslaitteilla, suojilla, kaapelointitekniikoilla tai erotteluetaisyydellä. Kohdissa c), d) ja e) esitetään sallitut poikkeukset tästä. Jos mikään näistä vaatimuksista ei täyty, tulee luokkaan 1E kuulumattomasta piiristä liittyvä piiri.
- c) Jos riittävä etäisyys ei toteudu tai sähköinen eristys puuttuu luokkaan 1E kuulumattomien piirien ja luokan 1E piirien tai liittyvien piirien välillä, tulee analyysillä osoittaa, ettei luokan 1E piirin toiminta heikkene alle sallitun tason tai luokkaan 1E kuulumattomasta piiristä tulee liittyvä piiri. Luokkaan 1E kuulumattomia piirejä ei saa reitittää redundanttisen divisioonan liittyvien kaapeleiden kanssa.
- d) Luokkaan 1E kuulumattomien instrumentointisignaalien ja ohjauspiirien ei tarvitse olla fyysisesti eroteltuja tai sähköisesti eristettyjä liittyvistä piireistä, kunhan (1) luokkaan 1E kuulumattomia piirejä ei reititetä redundanttisen divisioonan liittyvien kaapeleiden kanssa sekä (2) luokkaan 1E kuulumattomat piirit analysoidaan ja osoitetaan ettei luokan 1E piirien toiminta heikkene alle sallitun tason
- e) Luokkaan 1E kuulumattomia valokuitupiirejä ei tarvitse erotella fyysisesti luokan 1E piireistä tai liittyvistä piireistä. Sähköinen eristys on valokuitupiirien luontainen ominaisuus. Valokuitupiirejä voidaan pitää luokkaan 1E kuulumattomina piireinä siinä missä muut piirit olisivat liittyviä piirejä.

Luokan 1E piirit tulee reitittää ja suojata siten, ettei mekaanisen laitteen vikaantuminen yhdessä divisioonassa estä redundanttisten divisioonien luokan 1E piirejä tai tärkeitä laitteita suorittamasta turvallisuustoimintoaan. Mekaanisen järjestelmän viat ja virheet toiminnot tulee huomioida omassa divisioonassaan, jos luokan 1E piirejä tarvitaan näiden vaikutusten pienentämiseen. Yhdessä luokan 1E divisioonassa sähköisestä syystä

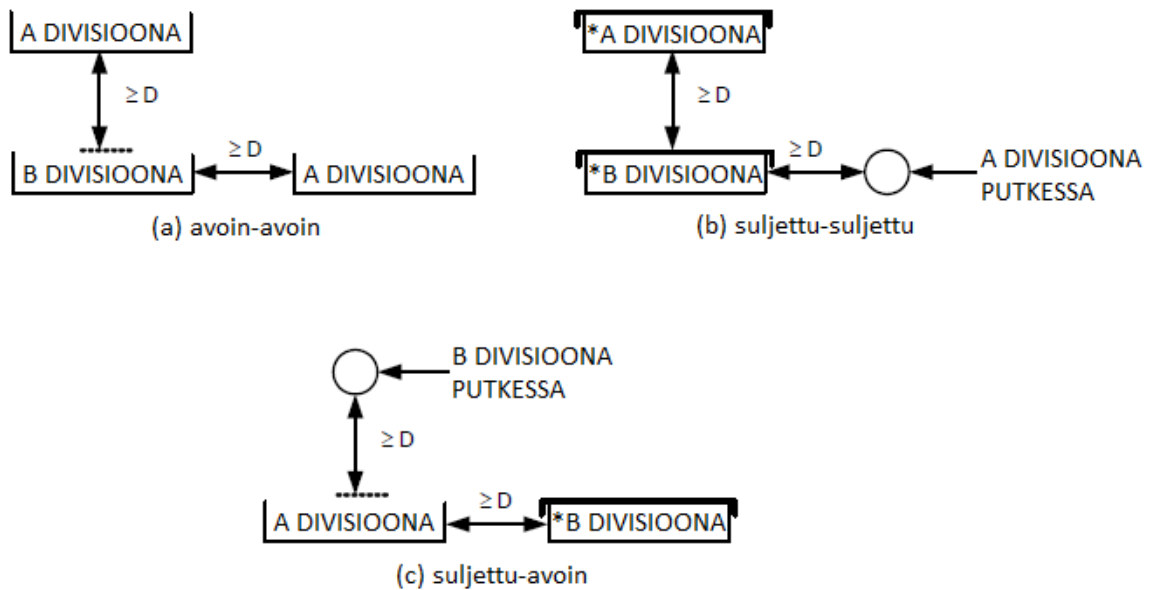
syttävä tulipalo ei saa aiheuttaa yhdenkään redundanttisen divisioonan luokan 1E toimintojen menetystä.

Sähkömagneettisten ja radiotaajuisten häiriöiden (EMI/RFI) mahdolliset vaikutukset redundanttisten luokan 1E laitteiden ja piirien itsenäisyyteen tulee huomioida. Häiriöiltä voidaan suojautua esimerkiksi maadoituksella, pienjännitteen käyttämisellä, fyysisellä erottelulla, erotuslaitteilla, häiriintyvien piirien tai häiriölähteiden suojauksella. Seuraavat sähkömagneettiset vuorovaikutukset tulee huomioida:

- a) Yhdessä luokan 1E divisioonassa syntyvät sähkömagneettiset häiriöt eivät saa heikentää redundanttisten luokan 1E laitteiden ja piirien turvallisuustoimintojen toteutumista.
- b) Luokan 1E piirin ympäristössä syntyvät sähkömagneettiset häiriöt eivät saa heikentää luokan 1E laitteiden ja piirien turvallisuustoimintojen toteutumista.

Tarkemmat erottelukriteerit luokan 1E ja liittyvien piirien erottelulle asetetaan standardin luvussa 5. Esitettyjä vähimmäiserotteluetäisyyksiä noudattamalla taataan eroteltujen piirien itsenäisyys. Kunnossapitoa, asennusta ja kaapeleiden päättämistä varten saatetaan tarvita suurempia etäisyyksiä. Etäisyydet perustuvat aikanaan teollisuudessa suoritettuihin tulipalokokeisiin [47]. Vaaditut erotteluetäisyydet riippuvat alueesta, jolla kaapelit kulkevat, sekä asennuskonfiguraatiosta. Alueita ja konfiguraatioita on molempia kolmea erilaista.

Asennuskonfiguraatiot on esitetty kuvassa 29. Avoin-avoin –konfiguraatio sisältää asennukset, joissa on avoimia kaapelihyllyjä ja/tai vapaasti asennettuja kaapeleita. Suljettu-suljettu –konfiguraatiossa kaapelit on asennettu suljettuihin kaapelihyllyihin ja/tai putkiin. Suljettu-avoin –konfiguraatiossa toinen osapuoli on suljetussa kaapelihyllyssä tai putkessa ja toinen avoimella kaapelihyllyllä tai vapaasti asennettuna.



* = Kiinteäpohjainen suljettu hylly
 D = Vähimmäiserotteluetaisyys (vaaka- tai pystysuunnassa)

Kuva 29. IEEE 384 mukaiset asennuskonfiguraatiot [48]

Aluejako perustuu kaapelointiin kohdistuviin uhkiin. Seuraavaksi esitellään alueluokkien ominaispiirteet sekä kullakin alueella vaaditut vähimmäiserotteluetaisyydet eri asennuskonfiguraatioille.

Vaarattomat alueet (*nonhazard areas*) ovat alueita, joissa:

- Ei ole suurienergisiä laitteita kuten kojeistoja, muuntajia, pyöriäviä laitteita tai palouhkia.
- On vain ohjaus- ja instrumentointipiirejä sekä tehoa syöttäviä kaapeleita ja niihin liittyviä laitteita, jotka palvelevat vain kyseistä aluetta.
- Tehopiirien kaapelit on asennettu suljettuihin kanaviin.
- Potentiaalisten uhkien muodostumista alueella ehkäistään hallinnollisilla ja kunnossapidollisilla toimenpiteillä
- Alue erotetaan alueista, joilla on tulipalo-, putki- tai missiiliuhkia.

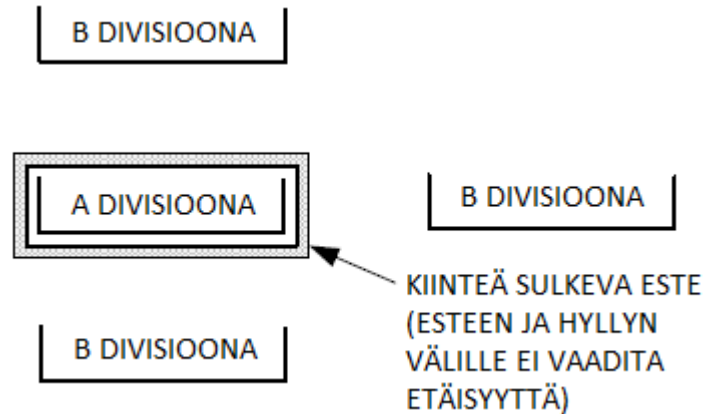
Vaarattomilla alueilla vaaditut erotteluetaisyydet johtaville piireille on esitetty taulukossa 5. Valokuitupiirien tapauksessa noudatetaan taulukon 7 mukaisia etäisyyksiä

Taulukko 5. Vähimmäiserotteluetaisyydet vaarattomilla alueilla

Konfiguraatio	Etäisyys
Avoin-avoin	2,5 cm vaakasuunnassa, 7,6 cm pystysuunnassa
Suljettu-suljettu	2,5 cm vaakasuunnassa, 7,6 cm pystysuunnassa
Suljettu-avoin	2,5 cm vaakasuunnassa, 7,6 cm pystysuunnassa ^a

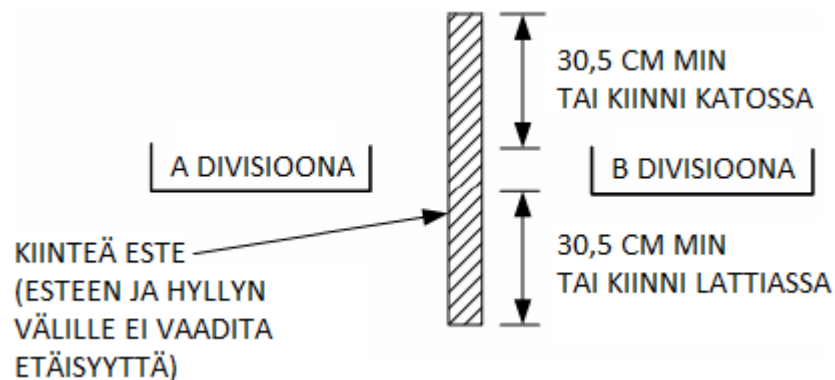
^a) 2,5 cm, jos suljettu osapuoli on avoimen alapuolella

Paikoissa, joissa taulukoiden mukaisia etäisyyksiä ei pystytä noudattamaan, on erotte-
lussa käytettävä esteitä. Hyväksyttäviä järjestelyjä esteillä erotteluun on esitetty kuvissa
30 ja 31. Kuvassa 30 yhden divisioonan kaapelihylly on koteloimalla erotettu toisen
divisioonan hyllyistä.



Kuva 30. Kaapelihyllyn erottelu koteloimalla [48]

Kuvassa 31 divisioonat on eroteltu kiinteällä suojalevyllä.



Kuva 31. Kaapelihyllyjen erottelu suojalevyllä [48]

Rajoitetun vaaran alueet (*limited hazard areas*) ovat muuten samanlaisia kuin vaaratto-
mat alueet paitsi, että tehopiirejä ei ole rajoitettu. Kaapelointia uhkaavat vaarat rajoittu-
vat siis edelleen vain alueen sisältämien sähkölaitteiden ja kaapeleiden vikaantumiseen.
Rajoitetun vaaran alueilla vaaditut erotteluetaisyydet on esitetty taulukossa 6. Etäisyyk-
siä on kolmea erilaista riippuen vuorovaikutuksessa olevien kaapelien tyypistä ja koos-
ta. Taulukossa esiintyvä AWG on amerikkalainen mitta kaapeleiden paksuudelle. Valo-
kuitupiireille sovelletaan edelleen taulukon 7 mukaisia erotteluetaisyyksiä.

Taulukko 6. Vähimmäiserotteluetaisyydet rajoitetun vaaran alueilla

Konfiguraatio	Vuorovaikutuksessa vain ohjaus- ja instrumentointikaapeleita (sama kuin taulukko 5)	Vuorovaikutuksessa pienjännitepiirejä, joissa $\leq 2/0$ AWG kokoisia kaapeleita	Vuorovaikutuksessa pienjännitepiirejä, joissa $\geq 2/0$ AWG kokoisia kaapeleita ja keskijännitepiirejä
Avo-in-avoin	2,5 cm vaaka 7,6 cm pysty	15,2 cm vaaka 30,5 cm pysty	0,92 m vaaka 1,53 m pysty
Suljettu-suljettu	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty
Suljettu-avoin	2,5 cm vaaka 7,6 cm pysty ^a	15,2 cm vaaka 30,5 cm pysty ^{a, b}	0,92 m vaaka 1,53 m pysty ^{a, b}

^a) 2,5 cm, jos suljettu osapuoli on avoimen alapuolella

^b) 2,5 cm vaakasuunnassa ja 7,6 cm pystysuunnassa, jos piirit avoimessa asennuksessa ovat vain ohjaus- ja instrumentointipiirejä

Vaaralliset alueet (*hazard areas*) jaetaan erikseen putkivaara-, missiilivaara- ja palovaa-ra-alueisiin. Vaarallisilla alueilla redundanttisten luokan 1E järjestelmien itsenäisyys pidetään hyväksyttävällä tasolla kaapelireittejä rajoittamalla tai käyttämällä yhdistelmiä erilaisista fyysisistä erottelutoimenpiteistä. Vähimmäiserottelu luokkaan 1E kuulumat-tomien ja luokkaan 1E kuuluvien tai liittyvien piirien välillä tulee edelleen olla taulukon 6 mukainen.

Vaarallisilla alueilla luokan 1E piirit ja liittyvät piirit tulee reitittää seuraavien vaatimus-ten mukaisesti ellei turvallisuustoimintojen täyttymistä putkirikon / missiilin / tulipalon sattua voida muulla tavoin osoittaa:

- Alueella, jossa putkitus / missiililähde / palouhka huomioidaan oletetuissa tapah-tumissa, eikä se kuulu vain yhteen divisioonan, eikä se vaadi suojaavia toimen-piteitä, saa kulkea vain yhteen divisioonan kuuluvia luokan 1E piirien tai liitty-vien piirien kaapeleita tai kaapelikanavia.
- Alueelle, jossa putkirikko / missiililähde / palouhka vaatii suojaavia toimenpitei-tä, saa kulkea vain luokan 1E piirien tai liittyvien piirien kaapeleita tai kaapeli-kanavia, joiden täytyy päättyä kyseisen alueen laitteisiin tai kuormiin.
- Alueella, jossa putkitus / missiililähde / palouhka huomioidaan oletetuissa tapah-tumissa, ja joka kuuluu vain yhteen divisioonan, eikä se vaadi suojaavia toimen-piteitä, saa kulkea vain putkituksen / missiililähteen / palouhkan kanssa samaan divisioonan kuuluvia luokan 1E piirien tai liittyvien piirien kaapeleita tai kaa-pelikanavia.
- Alueella, jossa putkitusta / missiililähdettä / palouhkaa ei huomioida oletetuissa tapahtumissa, saa kulkea vain luokan 1E piirien tai liittyvien piirien kaapeleita tai kaapelikanavia, joiden täytyy päättyä kyseisen alueen laitteisiin tai kuormiin. Kyseiset piirit tulee tällöin suojata vaara-alueesta soveltuvilla toimenpiteillä.

Valokuitupiirit eivät pysty heikentämään toisten valokuitupiirien tai virtapiirien toimintaa. Vikaantunut valokuitu ei siis voi toimia vian lähteenä vaan ainoastaan vian kohteena. Tästä syystä valokuitupiirejä koskevat erilaiset erotteluetaisyydet, jotka on esitetty taulukossa 7. Redundanttisia luokan 1E valokuitupiirejä ei tarvitse erotella toisistaan. Myöskään saman divisioonan luokkaan 1E kuulumattomia ja luokan 1E valokuitupiirejä ei tarvitse erotella toisistaan.

Taulukko 7. Vähimmäiserotteluetaisyydet turvallisuusluokitelluille (safety related) valokuitupiireille turvallisuusluokittelemattomista (non-safety related) virtapiireistä vaarattomilla ja rajoitetun vaaran alueilla

Konfiguraatio	Vuorovaikutuksessa vain instrumentikaapeleita	Vuorovaikutuksessa ohjauspiirejä	Vuorovaikutuksessa pienjännitepiirejä, joissa $\leq 2/0$ AWG kokoisia kaapeleita	Vuorovaikutuksessa pienjännitepiirejä, joissa $\geq 2/0$ AWG kokoisia kaapeleita ja keskijännitepiirejä
Avoin-avoin	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty	15,2 cm vaaka ^a 30,5 cm pysty ^a	15,2 cm vaaka ^a 30,5 cm pysty ^a	0,92 m vaaka 1,53 m pysty
Suljettu-suljettu	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty	7,6 cm vaaka 15,2 cm pysty	7,6 cm vaaka 15,2 cm pysty	7,6 cm vaaka 15,2 cm pysty
Suljettu-avoin	2,5 cm vaaka 2,5 cm pysty	15,2 cm vaaka ^a 30,5 cm pysty ^a	15,2 cm vaaka ^a 30,5 cm pysty ^a	0,92 m vaaka 1,53 m pysty

^a) 7,6 cm vaakasuunnassa ja 15,2 cm pystysuunnassa, jos valokuitupiirit ovat virtapiiriin alapuolella

Edellä esitetyistä erotteluetaisyyksistä voidaan tehdä poikkeuksia osoittamalla erottelu riittäväksi analyysin avulla. Analyysin tulee perustua testeihin, joilla arvioidaan poikkeavan kaapeloinnin ominaisuuksia, jotka mahdollistavat pienemmän etäisyyden käyttämisen. Näitä ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi eristys- ja vaippamateriaalit, paloa ehkäisevät ominaisuudet, kaapelointikanavien täyttö, kaapelikanavien tyypit, toimintakyky ja asettelu. Vaarallisten alueiden kaapeloinnissa voidaan huomioida myös uhkia pienentävät toimenpiteet, kuten tulipaloa sammuttavat sprinklerijärjestelmät. [48]

6.6 IEC

IEC on kansainvälinen kaikkien sähkötekniikan alojen standardisoimisorganisaatio. IEC tekee tiivistä yhteistyötä myös muiden standardointiorganisaatioiden kanssa kuten IEEE, ISO ja ITU. Eurooppalainen standardointiorganisaatio CENELEC harmonisoi IEC standardeja eurooppalaisiin käytäntöihin, jolloin standardin tunnukseksi tulee EN. Myös kansalliset standardointiorganisaatiot ovat harmonisoineet IEC standardeja itselleen kuten esimerkiksi saksalainen standardointiorganisaatio DIN. Myös IEC:n standardit pohjautuvat kaksiredundanttiseen ydinvoimalaitokseen IAEA:n ja IEEE:n standardien tapaan.

6.6.1 IEC 61226:2009

IEC standardien mukainen turvallisuusluokitus esitetään standardissa IEC 61226 Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Classification of instrumentation and control functions. [49] Standardi kategorioi ydinvoimalaitoksen turvallisuustoiminnot kolmeen kategoriaan, A, B ja C. Kategorioiden ulkopuolelle jäävillä toiminnoilla, järjestelmillä ja laitteilla ei ole merkitystä ydinturvallisuudelle (*not important to safety*). IEC standardien mukaiset turvallisuuskategoriat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. IEC 61226 mukaiset turvallisuuskategoriat

Kategoria	Turvallisuustoiminnot
A	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktorin pysäyttäminen ja alikriittisenä pitäminen - Suojarakennuksen eristäminen - Jälkilämmön siirtäminen lopulliseen lämpönieluun - Tärkeän tiedon toimittaminen ohjaajille
B	<ul style="list-style-type: none"> - Käytetyn polttoaineen altaan jäähdytys - Pääjäähdytysjärjestelmän eristäminen - Onnettomuuden jälkiseuranta - Primääri- ja sekundääripiirien säätö ja pitäminen sallitulla alueella sekä tapahtumien onnettomuuksiksi laajenemisen estäminen - Polttoaineen tarkkailu ja hallitseminen tapauksissa, joissa voi syntyä radioaktiivisia päästöjä tai polttoaine voi vaurioitua
C	<ul style="list-style-type: none"> - Yksittäisten järjestelmien ja laitteiden tarkkailu ja ohjaus onnettomuuksien jälkeen sekä radioaktiivisten päästöjen minimoiminen - Sisäisten uhkien vaikutusten rajoittaminen - Toiminnot, joiden väärän toiminnan seurauksena voi aiheutua pieniä radioaktiivisia päästöjä tai johtaa radioaktiivisiin uhkiin henkilöstölle - Toiminnot, jotka varoittavat sisäisistä ja ulkoisista uhista - Kulunvalvonta - Hätjärjestelyissä tarvittu kommunikaatio, jolla varoitetaan radioaktiivisista päästöistä

6.6.2 IEC 60709:2004

IEC 60709 Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Separation standardi määrittää vaatimukset ydinvoimalaitosten automaatiojärjestelmien turvallisuudelle tärkeiden kaapeleiden erottelulle. Standardin esittämällä toimenpiteillä saavutetaan riittävä fyysinen erottelu turvallisuudelle tärkeiden järjestelmien sekä järjestelmien redundanttisten osien välillä. Kyseinen erottelu on tarpeellista, jotta vikojen, jotka voivat levitä tai vaikuttaa useisiin järjestelmiin tai saman järjestelmän osiin, vaikutukset estetään tai minimoidaan. Fyysinen erottelu toteutetaan turvallisuusluokitelluilla rakenteilla, esteillä tai fyysisellä etäisyydellä tai näiden yhdistelmillä.

Yleisiä vaatimuksia esitetään kategorioiden A ja B turvallisuustoimintojen turvaamiseksi. Kategorian A järjestelmien redundanttisten osien tulee olla suunniteltu ja asennettu siten, ettei mikään yksittäinen tapahtuma estä kategorian A turvallisuustoiminnon toteuttamista. Kategorian B järjestelmien redundanttisten osien tulee olla suunniteltu ja asennettu siten, ettei järjestelmän yksittäinen suunnittelu- tai toimintavirhe estä kategorian B turvallisuustoiminnon toteuttamista. Laitoksen sisäisten ja ulkoisten tapahtumien vaikutukset kategorian B turvallisuustoimintojen täyttymiselle täytyy käsitellä tapauskohtaisesti.

Turvallisuudelle tärkeiden automaatiojärjestelmien redundanttisten kaapeleiden täytyy toteuttaa seuraavat kohdat:

- Jokaisen redundanttisen ryhmän kaapeleiden tulee kulkea omalla fyysisesti erotellulla reitillä.
- Jokaisella kaapelireitillä tulee olla vain saman redundanssin kaapeleita.
- Automaatiojärjestelmien aiheuttamien vikojen, jotka vaikuttavat kaapelointijärjestelmiin, vaikutuksia varten riittää, että käytetään matalan tason fyysistä erottelua. Redundanttisten kaapeleiden välinen etäisyys tulee tällöin olla vaakasuunnassa vähintään 30 cm ja pystysuunnassa 80 cm. Jos vähimmäisetäisyys alittuu, täytyy kaapelit sijoittaa suljettuihin kaapelikanaviin tai muuten perustella analyysien avulla, miksi pienempää etäisyyttä voidaan käyttää.
- Laitoksen sisäisten ja ulkoisten tapahtumien, kuten tulipalojen ja rakenteiden pettämisen, torjumiseksi tulee soveltaa parempaa fyysistä erottelua, joka sisältää esteitä ja/tai suojarakenteita.

Kategorian A piireihin läheisesti liittyvät kaapelit voidaan luokitella niin sanotuiksi liittyviksi piireiksi (*associated circuits*). Tällöin niitä koskevat hieman eri käytännöt. Katteoriaan A kuulumattomat kaapelit tulevat liittyviksi piireiksi jos yksikin seuraavista toteutuu:

- Kaapelilla on yhteys kategorian A tehollähteeseen ilman eristyslaitetta.
- Kaapelilla on yhteys kategorian A järjestelmän tehollähteeseen ilman eristyslaitetta.
- Kaapeli on kategorian A piirin tai laitteen lähellä ilman vaadittua erottelua (etäisyys tai este)
- Kaapeli on liittyvän piirin tai laitteen lähellä ilman vaadittua erottelua (etäisyys tai este)
- Kaapeli käyttää kategorian A signaalia tai liittyvää signaalia (*associated signal*) ilman eristyslaitetta.

Liittyvien piirien tulee täyttää yksi seuraavista:

1. Liittyvät piirit tulee identifioida liittyviksi piireiksi tai kategorian A piireiksi ja niiden tulee pysyä samassa divisioonassa tai olla samalla tavalla fyysisesti eroteltuja kuin ne kategorian A piirit, joihin ne liittyvät. Liittyviin piireihin kohdis-

tuu samat vaatimukset kuin kategorian A piireihin, ellei voida osoittaa, että näiden vaatimusten toteuttamatta jättäminen ei heikennä kategorian A piirien toimintaa alle hyväksyttävän tason.

2. Liittyvien piirien tulee toteuttaa kohta (1) sekä sisältää erotuslaite, jonka jälkeen piiri on kategoriaan A kuulumaton, ellei piiristä tule uudestaan liittyvä piiri.
3. Liittyvät piirit tulee analysoida tai testata ja tätä kautta osoittaa, että ne eivät heikennä kategorian A piirien toimintaa alle hyväksyttävän tason.

Liittyvien piirien konseptia voitaisiin soveltaa myös muihin kuin kategorian A piireihin, mutta sillä ei välttämättä saavutettaisi enää niin merkittäviä parannuksia turvallisuuteen. Menettely voisi johtaa useisiin piirikategorioihin. Esimerkiksi eri kategorioiden kaapeleita ei tarvitse erotella toisistaan saman turvallisuusryhmän sisällä, jos korkeamman kategorian turvallisuustoiminto voidaan suorittaa redundanttisella turvallisuusryhmällä, joka on eroteltu turvallisuusryhmästä, joka sisältää liittyvät piirit.

Turvallisuudelle tärkeiden piirien itsenäisyys turvallisuuden kannalta epätärkeistä piireistä saavutetaan täyttämällä seuraavat vaatimukset:

- a) Kategoriaan A kuulumattomat piirit tulee erotella fyysisesti kategorian A piireistä tai liittyvistä piireistä aiemmin mainittujen vähimmäisetäisyyksien mukaisesti tai kuten kohdassa d) mainitaan tai piirit tulee identifioida liittyviksi piireiksi.
- b) Kategoriaan A kuulumattomat piirit tulee erotella sähköisesti kategorian A piireistä ja liittyvistä piireistä käyttäen eristyslaitetta, suojausta ja kaapelointitekniikoita tai riittävällä etäisyydellä tai kuten kohdassa d) mainitaan tai piirit tulee identifioida liittyviksi piireiksi.
- c) Vähimmäisetäisyyksistä poiketessa tai eristyslaitteen puuttuessa kategoriaan A kuulumattomien piirien ja kategoriaan A kuuluvien tai liittyvien piirien välistä, tulee analyysillä osoittaa, että kategorian A piirien toiminta ei heikkene alle hyväksyttävän tason tai kategoriaan A kuulumattomat piirit tulee identifioida liittyviksi piireiksi.
- d) Kategoriaan A kuulumattomat instrumentointisignaalien ja ohjauspiirien ei tarvitse olla fyysisesti eroteltuja tai sähköisesti erotettuja liittyvistä piireistä, kunhan kategoriaan A kuulumattomia piirejä ei reititetä redundanttisen divisioonan liittyvien piirien kanssa sekä osoitetaan, että kategoriaan A kuulumattomat piirit eivät heikennä kategorian A piirien toimintaa alle hyväksyttävän tason.

Analogisia tai muita matalan tason sähköisiä signaaleja ei saa viedä samoilla kaapelihyllyillä tai putkissa, joissa on myös voimakaapeleita. Teknologiasta riippuen sähkökeskusten ohjaussignaalit voivat olla matalaa tai korkeaa tasoa. Valokuitukaapeleita saa viedä yhdessä voimakaapeleiden kanssa, kunhan niiden mekaaninen suojaus ei vaarannu.

Kaapeleita ei saa viedä lähelle putkia, jotka kuljettavat paineistettua tai korkeassa lämpötilassa olevaa ainetta, kuten öljyä, höyryä, vettä tai nestemäisiä metalleja, jos putkessa

kulkeva aine voi vahingoittaa kaapeleita vuotamalla tai suihkuamalla. Poikkeuksena anturin tai toimilaitteen kaapeli voidaan viedä lähelle putkistoa, jos prosessi sitä vaatii.

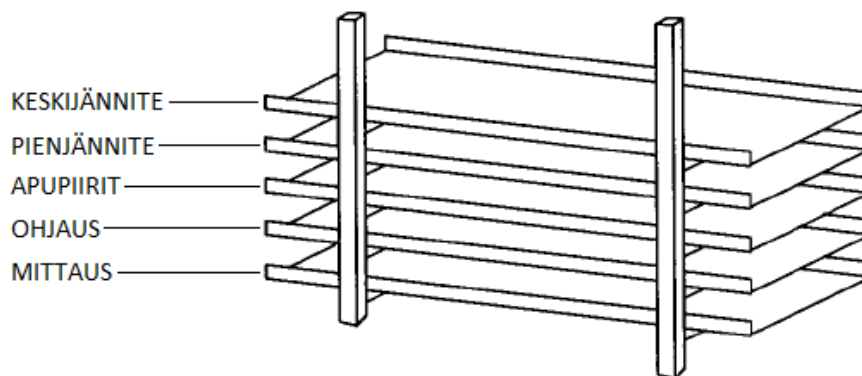
Kaapeleiden terminen ja fyysinen rasitus tulee huomioida asennettaessa kaapeleita kaapelihyllyille, jotta fyysisen erottelun toimenpiteet eivät heikkene. Jotta hyllyjen alimmat kaapelit ei vaurioidu päällä olevista kaapeleista, on kaapeleiden maksimi asennussyvyys hyllyllä määriteltävä.

Kaikkien kaapeleiden tulee olla palon leviämistä estäviä. Lisäksi turvallisuudelle tärkeiden järjestelmä- tai laitekaapeleiden ollessa lähellä voimakaapeleita, tulee käyttää tulenkestäviä esteitä, jotka erottelevat kategorian A järjestelmäkaapelit kaikista muista kaapeleista. Jos osoitetaan, että kategorian A kaapelit säilyttävät piirinsä eheyden tulipalossa ja kaapelin eristys kestää suuremmat jännitteet kuin viasta aiheutuu läheisyydessä oleviin alemman kategorian piireihin, niin kyseiset kaapelit tarjoavat riittävän suojan sähköisesti aiheutuneilta tulipaloilta. Tällöin kategorian A kaapeleiden fyysinen erotteletäisyys voi olla alle aiemmin mainittujen vähimmäisetäisyyksien. [37]

6.6.3 IEC 61000-5-2:1997

Ohjeita kaapeloinnin EMC-suunnittelun toteutukselle annetaan standardissa IEC 61000-5-2 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling. [28] Varsinaisia suoria vaatimuksia standardi ei kuitenkaan anna, koska EMC-suunnittelu voidaan toteuttaa monella tapaa riippuen kaapeloinnin toteutuksesta.

Magneettikenttien välityksellä siirtyvien sähkömagneettisten häiriöiden estämiseksi standardi neuvoo jättämään vähintään 0,15 m väliä erityyppisiä kaapeleita sisältäville kaapelihyllyille sekä pysty- että leveyssuunnassa. Kaapelihylly, joka sisältää herkkiä mittakaapeleita, suositellaan sulkemaan suojalla, jos hyllyn etäisyys on alle 1 m voimakaapeleista. Standardin mukaan kokemus on osoittanut, että hyllyt kannattaa pinota kuvan 32 mukaisessa jänniteluokkien mukaan alenevassa järjestyksessä siten, että keskijännitekaapelit tulevat ylimmälle hyllylle ja herkimmät mittakaapelit alimmalle hyllylle.



Kuva 32. Päällekkäisten kaapelihyllyjen järjestys [28]

6.7 KTA

Saksalainen standardisoimisorganisaatio KTA julkaisee ydinturvallisuusstandardeja, jotka perustuvat käyttökokemuksiin ydinvoimalaitosten lisensoinnista, rakentamisesta ja käytöstä. Standardit pidetään ajantasaisina arvioimalla ne uudelleen maksimissaan viiden vuoden välein. KTA perustettiin vuonna 1972 ja tähän mennessä se on julkaissut 97 ydinturvallisuusstandardia. Standardit ovat saavuttaneet merkittävän aseman eurooppalaisten ydinvoimalaitosten suunnittelussa ja vaatimusten asettelussa.

6.7.1 KTA 3701 (6/99)

KTA 3701 General Requirements for the Electrical Power Supply in Nuclear Power Plants standardi määrittää yleiset vaatimukset ydinvoimalaitoksen turvallisuuden kannalta tärkeälle sähkönjakelulle.

Standardin mukaan hätätehoa syöttävien järjestelmien redundanttisuuden tulee vastata niihin liittyvien prosessijärjestelmien redundanttisuutta. Hätätehojärjestelmien tulee täyttää tehtävänsä testauksien ja korjauksien sekä samanaikaisen yksittäisen vian aikana, jos tätä vaaditaan myös järjestelmään liittyvältä prosessijärjestelmältä. Oletettujen onnettomuuksien hallinnassa tarvittaviin järjestelmiin on yleisesti sovellettava tätä N+2 – vikakriteeriä.

Hätätehojärjestelmien tulee koostua redundanttisista osajärjestelmistä, joilla on jokaisella oma syöttönsä sekä omat hätätehoa tuottavat järjestelmät, kaapelireitit ja tukijärjestelmät, mitkä varmistavat redundanssien toiminnallisen itsenäisyyden. Poikkeustapauksissa hätätehojärjestelmän kuormia voidaan syöttää useammasta redundanssista, jos tämä ei alenna luotettavuutta. Kyseisissä tapauksissa kytkennät pitää suunnitella siten, että vain yksi redundanssi pystyy vikaantumaan kaikissa vikatapauksissa.

Hätätehojärjestelmien redundanssit tulee olla fyysisesti eroteltuja tai suojattuja toisistaan siten, että yhdessä redundanssissa esiintyvä vika ei pääse vaikuttamaan toiseen redundanssiin. Myöskään yksittäinen laitoksen sisäinen tapahtuma ei saa johtaa kuin yhden redundanssin vikaantumiseen. [50]

6.7.2 KTA 3705 (11/2006)

KTA 3705 Switchgear, Transformers and Distribution Networks for the Electrical Power Supply of the Safety System in Nuclear Power Plants antaa vaatimuksia ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmien sähkönsyötön kojeistoille, muuntajille ja jakeluverkolle.

Standardin mukaan kaapelit on sijoitettava kaapelihyllyille siten, että tarvittava erottelu toteutuu korkeajännite- ja pienjännitevoimakaapeleiden välillä sekä voimakaapeleiden

ja instrumentointi- ja ohjausjärjestelmien kaapeleiden välillä. Kaapelit tulee reitittää niin, että vaatimukset ulkoisia uhkia, redundanttisuutta, toiminnallista itsenäisyyttä ja fyysistä erottelua vasten toteutuvat. [51]

6.7.3 KTA 3501 (1985-06)

KTA 3501 Reactor Protection System and Monitoring Equipment of the Safety System antaa vaatimuksia reaktorin suojausjärjestelmän kaapeloinnille. Yleisesti reaktorin suojausjärjestelmän redundanttiset osat tulee ryhmitellä ja erotella riittävästi toisista redundantseista siten, että yksittäinen vika ei voi johtaa alle sallittuun määrään redundanttisia osia. Jos riittävää erottelua ei voida tehdä etäisyyden avulla, on käytettävä riittävää mekaanista suojaa.

Reaktorin suojausjärjestelmän redundanttisten osien kaapelit tulee erotella toisistaan etäisyydellä tai ne tulee reitittää siten, että kaapelit ovat fyysisesti suojattuja toisiltaan. Redundanttisten osien signaaleja ei saa syöttää samalla kaapelilla, paikallisella jakorasi-alla ja läpiviennillä. Reaktorin suojausjärjestelmän kaapelit voidaan jättää suojaamatta vain, jos epätarkoituksenmukainen mekaaninen vahinko on mahdotonta normaalin käytön aikana. Muissa tapauksissa kaapelit tulee suojata fyysisesti esimerkiksi putkilla tai metallisilla levyillä. Reaktorin suojausjärjestelmän kaapelit tulee reitittää erilleen tai suojata fyysisesti komponenteilta, jotka voivat aiheuttaa niille vaaraa, kuten putket. Reaktorin suojausjärjestelmän signaalikaapelit ja redundanttisten antureiden ja ohjausjärjestelmien tehonsyöttökaapelit tulee reitittää signaalinkäsittelymoduuleille ilman keskitettyä kaapelijakajaa. [52]

6.8 Yhteenveto

Suomalaisten ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erotteluperiaatteet ja -vaatimukset esitetään YVL-ohjeissa. YVL-ohjeiden vaatimukset velvoittavat lisäksi noudattamaan kaapeloinnin erottelussa kansainvälisiä ydinteknisiä standardeja, joista yleisesti sovellettuja ovat ainakin IEEE:n, IEC:n ja KTA:n standardit. Työssä tarkasteltiin myös IAEA:n turvallisuusstandardeja, jotka toimivat perustana YVL-ohjeiden vaatimustenasettelussa.

YVL-ohjeiden ja standardien vaatimusten yhdistäminen voi olla paikoittain hankalaa, koska taustalla on usein erilainen vaatimustaso. YVL-ohjeet vaativat tärkeimmiltä turvallisuusjärjestelmiltä N+2 –vikakriteerin täyttämistä, jota standardeista vaativat ainoastaan KTA:n standardit. IAEA:n, IEEE:n ja IEC:n standardit vaativat vain N+1 –vikakriteerin toteuttamista.

YVL-ohjeiden ja standardien vaatimusten mukaan kaapeloinnin erottelussa tulee **riittäväällä** tavalla:

1. Varmistaa syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuus.
2. Erottaa turvallisuusjärjestelmien rinnakkaiset osajärjestelmät.

3. Estää sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen.
4. Erottaa eri turvallisuusluokkiin kuuluvat järjestelmät.

YVL-ohjeet ja IAEA:n turvallisuusstandardit vaativat varmistamaan syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuuden. Molempien vaatimukset painottavat erityisesti vakavien onnettomuuksien hallintaan tarvittavien järjestelmien riippumattomuuden varmistamista fyysisen ja toiminnallisen erottelun soveltamisella.

Turvallisuusjärjestelmien rinnakkaiset osajärjestelmät tulee erottaa kaikkien käsiteltyjen vaatimuslähteiden mukaan niin, että yhden osajärjestelmän vikaantuminen ei vaikuta muihin rinnakkaisiin osajärjestelmiin tai muihin samaa turvallisuustoimintoa suorittaviin järjestelmiin. Myöskin yksittäisen tapahtuman, kuten tulipalon, vaikutukset tulee rajoittaa yhteen redundanttiseen laitososaan.

Sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen estetään vaatimusten mukaan kaapeleiden jänniteluokkien määrittämisellä ja erottamisella (sähköisellä eristämällä) toisistaan ja muista sähkölaitteista riittävällä tavalla. Jokainen standardi määrittelee omat jänniteluokkansa, jotka tulisi erotella. Suomessa tehtävien sähköasennusten tulee kuitenkin noudattaa standardin SFS-EN 60038 mukaisia CENELEC:n määrittämiä standardijännitteitä. Suomalainen käytäntö, standardien määrittämät jänniteluokat ja tyypilliset EMC-ongelmat yhdistämällä, voidaan standardien vaatimuksista muodostaa yhtenäinen linja, jonka mukaan jänniteluokat kaapelityypeittäin tulee erotella toisistaan ainakin seuraavien luokkien välillä (suluissa esimerkkejä uusissa suomalaisissa asennuksissa käytetyistä jännitteistä):

- Keskijännitteiset voimakaapelit (10 kV)
- Pienjännitteiset voima- ja ohjauskaapelit (690 V, 400 V, 230 V, 220 VDC, 110 VDC, 24 VDC)
- Instrumentointi/signaalikaapelit

Valokuitukaapelit ovat niin sanottuja luokattomia kaapeleita, jolloin niitä ei tarvitse erotella sähköisessä mielessä.

Käsitellyt standardit, pois lukien KTA-standardit, vaativat turvallisuusluokan 2 kaapeloinnin erottamista fyysisesti ja toiminnallisesti alempaan turvallisuusluokkaan kuuluvista laitteista ja kaapeleista. YVL-ohjeet taas vaativat erottelemaan toiminnallisesti kaikki turvallisuusluokat niin, että alemman turvallisuusluokan järjestelmän toimintatapa tai vikaantuminen ei aiheuta ylemmän turvallisuusluokan järjestelmän vikaantumista. Turvallisuusluokkiin pohjautuva erottelu suomalaisessa neliredundantisessa ydinvoimalaitoksessa ei kuitenkaan ole välttämättä käytännöllisesti mielekästä. Vaatimusten ristiriitaisuuden ja tulkinnanvaraisuuden takia turvallisuusluokkien erottelua kaapeloinnissa tulee harkita aina tapauskohtaisesti.

IEEE:n ja IEC:n standardeissa sovelletaan niin sanottua liittyvien piirien konseptia. Piiristä tulee liittyvä piiri, jos se liittyy läheisesti jollain tapaa turvallisuusluokan 2 piiriin. Konseptia noudattamalla estetään liittyvää kaapelia risteilemästä rinnakkaisten osajärjestelmien välillä ja tätä kautta heikentämästä siihen liittyvän turvallisuusluokan 2 piirin toimintaa. Konseptin soveltamisella pyritään siis lyhyesti sanottuna välttämään häiriöiden leviäminen divisioonasta toiseen ja alemmasta turvallisuusluokasta ylempään.

Tarkkoja erotteluetaisyyksiä asetetaan ainoastaan standardissa IEEE 384. Kyseiset etäisyydet perustuvat aikanaan teollisuudessa tehtyihin tulipalokokeisiin, joilla tutkittiin tulipalon leviämistä kaapelihyllystä toiseen [47]. Standardissa kuvataan myös toimenpiteitä, joilla erotteluetaisyyksistä voidaan poiketa erilaisten suojien avulla. IEC standardeissa mainitaan lyhyesti etäisyydet, joilla redundanttiset automaatiokaapelit tulee erottaa sekä etäisyydet, joilla estetään sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen kaapelihyllyjen kaapeleiden välillä.

YVL-ohjeiden ja käsiteltyjen standardien pääajatuksat ja vaatimukset on koottu vielä taulukkomuotoon taulukkoon 9. YVL-ohjeiden olennaisimmat vaatimukset on lisäksi koottu liitteen D taulukkoon 11.

Taulukko 9. Yhteenvedo kaapeloinnin erotteluvaatimuksista

	YVL-ohjeet	IAEA	IEEE	IEC	KTA
Vikakriteeri	N+2 (4-red.)	N+1 (2-red.)	N+1 (2-red.)	N+1 (2-red.)	N+2 (4-red.)
DiD-tasot	Tasojen on oltava niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on saavutettavissa	Tasojen on oltava niin itsenäisiä kuin käytännöllisin toimenpitein on saavutettavissa.	N/A	N/A	N/A
Rinnakkaisuus	Rinnakkaiset osajärjestelmät on erotettava luotettavasti.	Rinnakkaiset osajärjestelmät on erotettava luotettavasti.	Rinnakkaiset osajärjestelmät on erotettava luotettavasti.	Rinnakkaiset osajärjestelmät on erotettava luotettavasti.	Rinnakkaiset osajärjestelmät on erotettava luotettavasti.
Jänniteluokat	Sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen on estettävä luotettavasti.	<ul style="list-style-type: none"> - Suurjännite ($U > 35 \text{ kV}$) - Keskijännite ($1 \text{ kV} < U < 35 \text{ kV}$) - Pienjännite ($U < 1 \text{ kV}$) - Instrumentointi ja ohjaus 	<ul style="list-style-type: none"> - Keskijännite ($2001 \text{ V} < U < 15000 \text{ V}$) - Pienjännite ($U < 2000 \text{ V}$) - Ohjaus - Instrumentointi 	<ul style="list-style-type: none"> - Voimajännitteet - Herkät signaalit 	<ul style="list-style-type: none"> - Suurjännite - Pienjännite - Instrumentointi ja ohjaus
Turvallisuusluokat	Turvallisuusluokat on eroteltava toiminnallisesti.	Turvallisuusluokka 2 on eroteltava fyysisesti.	Turvallisuusluokka 2 on eroteltava fyysisesti ja toiminnallisesti.	Turvallisuusluokka 2 on eroteltava fyysisesti ja toiminnallisesti.	N/A
Muuta	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Liittyvien piirien konsepti - Tarkat erotteluetaisyydet 	<ul style="list-style-type: none"> - Liittyvien piirien konsepti 	N/A

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmien kaapeloinnissa tulee soveltaa riittävällä tavalla fyysistä ja toiminnallista erottelua. Fyysinen erottelu suojaa kaapeleita vaurioitumiselta erilaisten sisäisten ja ulkoisten tapahtumien kuten tulipalojen tai tulvien seurauksena. Fyysinen erottelu toteutetaan etäisyydellä, esteillä, sijoittelulla tai näiden yhdistelmillä. Toiminnallisella erottelulla varmistetaan kaapeleiden virheetön toiminta eli estetään esimerkiksi sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen. Toiminnallinen erottelu tai toisin sanoen sähköinen eristäminen saavutetaan etäisyydellä, erotuslaitteilla, suojuilla, kaapelointitekniikoilla tai näiden yhdistelmillä.

Kansalliset YVL-ohjeet ja kansainväliset ydintekniset standardit vaativat suomalaisten ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erottelun toteuttamista **riittävällä** tavalla ainakin seuraavien neljän tason tai luokan sisällä:

1. Syvyys-suuntaisen puolustuksen tasot
2. Turvallisuusjärjestelmien rinnakkaiset osajärjestelmät
3. Jänniteluokat
4. Turvallisuusluokat

Erityistapauksissa, kuten valvomon ja varavalvomon kaapeloinneissa, tulee huolehtia myös järjestelmien välisestä erottelusta. Seuraavissa kappaleissa pohditaan perusteita vaatimusten toteuttamiselle ja esitetään sen pohjalta johtopäätökset, jotka kertovat millä tavalla kaapeloinnin erottelua tulisi tehdä suomalaisella ydinvoimalaitoksella.

7.1 Syvyys-suuntaisen puolustuksen tasojen erottelu

Ydinvoimalaitoksen syvyys-suuntainen puolustus rakentuu useista toisiaan varmentavista puolustustasoista. Yksittäisen tason tulee olla niin vahva, että se pystyy suorittamaan tarvittavat turvallisuustoiminnot riippumatta muista puolustustasoista. Tasojen tulee olla toisistaan niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista saavuttaa. Riippumattomuudella estetään usean puolustustason menettäminen samasta syystä tai saman tapahtuman seurauksena. Erityisesti syvyys-suuntaisen puolustuksen tason 4 (vakavien onnettomuuksien hallinta) riippumattomuus tulisi varmistaa, jotta poikkeuksellisissa laitostapahtumissa, joita suunnittelussa ei välttämättä osata huomioida, olisi vielä yksi toimintakykyinen puolustustaso, joka estää suuren radioaktiivisen päästön syntymisen.

Kaapeloinnissa syvyysuuntaisten puolustustasojen riippumattomuus toteutetaan:

1. Sähköjärjestelmien selektiivisellä suojauksella
2. Kaapeloinnin fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla

Selektiivinen suojaus toteutetaan erotuslaitteilla (sulakkeet, katkaisijat ja releet), jotka vikatilanteessa erottavat pelkästään vikaantuneet verkon osat jännitteettömiksi. Suojauksen riittävän nopealla toiminnalla estetään vikojen leviäminen usealle syvyysuuntaiselle puolustustasolle sekä mahdollistetaan sähkönsyötön ja tiedonsiirron palauttaminen vian ollessa ohi. Erotuslaitteiden toiminta varmistetaan varasuojalla. Erotuslaitteet tulee kahdentaa tilanteissa, joissa kaapeleita viedään vieraaseen divisioonaan.

Kaapeloinnin fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla on kaksi tehtävää syvyysuuntaisten puolustustasojen välisen riippumattomuuden varmistamisessa. Ensinnäkin erottelulla estetään eri puolustustasoilla olevien kaapelien häiriintyminen tai vikaantuminen muilla tasoilla olevien kaapelien tai laitteiden toiminnasta. Toisekseen erottelulla pyritään estämään useamman puolustustason kaapeloinnin vioittuminen samasta syystä tai saman tapahtuman kuten tulipalon seurauksena.

YVL-ohjeiden ja IAEA:n vaatimusten mukaan syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen tulee olla niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Vaatimuksissa painotetaan erityisesti vakavien onnettomuuksien hallintaan tarvittavan kaapeloinnin riippumattomuuden varmistamista fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla.

Kaapeloinnin erottelussa käytännöllisiä toimenpiteitä rajoittavat usein tilarajoitukset. Tilarajoitusten takia voi olla kohtuutonta vaatia kaapeloinnin erottelun toteuttamista jokaisen syvyysuuntaisen puolustustason välillä. Tällä saavutettu parannus ydinturvallisuuteen voitaisiin myös kyseenalaistaa kaapeloinnin varsin passiivisen teknisen luonteen ja epätodennäköisen vikaantumisen takia. Kaapeloinnin erottelu tulee suhteuttaa aina myös muuhun laitossuunnitteluun, koska kaapelointi on turvallisuustoimintojen tukijärjestelmä.

Johtopäätös 1, syvyysuuntainen puolustus:

Syvyysuuntaisen puolustuksen tasolla 4 (vakavien onnettomuuksien hallinta) tarvittavan kaapeloinnin riippumattomuus tulee varmistaa fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla. Lisäksi tulee tapauskohtaisesti harkita toimenpiteitä myös muiden tasojen riippumattomuuden varmistamiseksi.

7.2 Rinnakkaisten osajärjestelmien erottelu

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät jaetaan useampaan rinnakkaiseen osajärjestelmään riittävän luotettavuuden ja käytettävyyden saavuttamiseksi. Vikojen leviäminen osajärjestelmästä toiseen estetään rinnakkaisten osajärjestelmien toiminnallisella itsenäisyydellä ja sijoittamalla osajärjestelmät YVL-ohjeiden mukaisiin turvallisuusloh-

koihin, jotka erottavat rinnakkaiset osajärjestelmät fyysisesti toisistaan. Turvallisuuslohkot sekä rakennusten ja järjestelmien sijoittelu estävät usean rinnakkaisen osajärjestelmän vikaantumiset sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutuksesta. Ristiinkytkentöjä saa tehdä rinnakkaisten osajärjestelmien välillä vain, jos se parantaa kokonaisjärjestelmän luotettavuutta. Tässäkin tapauksessa tulee luotettavasti varmistaa, että mahdollinen vika voi vaikuttaa kerrallaan vain yhteen osajärjestelmään. Vieraaseen divisioonaan vietyjen kaapelien erotuslaitteet tulee kahdentaa siten, että molemmissa divisioonissa on erotuslaite.

Kaapelit kulkevat pääsääntöisesti saman turvallisuuslohkon sisällä mutta kaapeleita joudutaan viemään myös turvallisuuslohkosta toiseen välttämättömän sähkönsyötön ja tiedonsiirron (esim. automaatiojärjestelmän äänestykseen) suorittamiseksi. Tällöin rinnakkaisten osajärjestelmien erottelua ei takaa pelkästään turvallisuuslohkot, vaan erottelusta tulee varmistua myös vieraan turvallisuuslohkon sisällä fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla. Erottelulla estetään vikojen leviäminen rinnakkaisesta osajärjestelmästä toiseen. Suunnitteluperusteissa tulee kuitenkin huomioida yhden palo-osaston täydellinen tuhoutuminen, mikä tarkoittaa kaikkien palo-osastossa olevien kaapelien (myös vieraasta turvallisuuslohkosta tulleiden) tuhoutumista.

Johtopäätös 2, rinnakkaisuus:

Turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisten osajärjestelmien kaapeloinnit tulee erotella fyysisesti ja toiminnallisesti. Erottelulla tulee estää luotettavasti vikojen leviäminen osajärjestelmästä toiseen tai muihin samaa turvallisuustoimintoa suorittaviin järjestelmiin. Sisäisten ja ulkoisten uhkien vaikutukset tulee rajata kerrallaan vain yhteen rinnakkaiseen laitososaan rakenteellisella suojauksella ja sijoittelulla. Suunnitteluperusteena tulee käyttää oletusta, jossa esimerkiksi tulipalon johdosta kaikki yhden turvallisuuslohkon sisältämät kaapelit tuhoutuvat. Turvallisuusluokan 2 kaapeloinnin tulee varmistaa turvallisuustoimintojen toteutuminen myös yhtäaikaisen toisessa turvallisuuslohkossa tehtävän korjauksen tai huollon aikana (N+2 –vikakriteeri).

7.3 Jänniteluokkien erottelu

Eri jänniteluokkien kaapelit tulee erotella toisistaan sähkömagneettisten häiriöiden leviämisen estämiseksi. Jänniteluokat riippuvat teknisistä valinnoista mutta yleensä ydinvoimalaitosten kaapeloinnista voidaan tunnistaa ainakin seuraavat jänniteluokat:

- Keskijännitteiset voimakaapelit
- Pienjännitteiset voima- ja ohjauskaapelit
- Instrumentointikaapelit

Jänniteluokkien erottelu saavutetaan käyttämällä riittävää etäisyyttä, erotuslaitteilla, metallisilla suojilla, kaapelien ominaisuuksilla ja kaapelointitekniikoilla. Tarkempia toimenpiteitä kuvataan esimerkiksi standardeissa IEEE 384, IEC 60709 ja IEC61000-5-2.

Johtopäätös 3, sähkömagneettiset häiriöt:

Sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen tulee estää kaapeloinnissa sopivien jänniteluokkien määrittämisellä ja luokkien riittävällä erottelulla.

7.4 Turvallisuusluokkien erottelu

Ydinvoimalaitoksen kaikki rakenteet, laitteet ja kaapelit jaetaan turvallisuusluokkiin. Turvallisuusluokka kuvaa komponentin turvallisuusmerkitystä. Kaapelit kuuluvat turvallisuusluokkiin 2, 3 ja EYT. Kaikki turvallisuusluokan 2 kaapelit kuuluvat ydinvoimalaitoksen pääpuolustuslinjaan.

YVL-ohjeet vaativat turvallisuusluokkien toiminnallista erottelua siten, että alemman turvallisuusluokan järjestelmän tai laitteen toimintatapa tai vikaantuminen ei saa aiheuttaa ylemmän turvallisuusluokan järjestelmän tai laitteen vikaantumista tai toiminnan menetystä. Usein turvallisuusluokkien erottelu kyseisen vaatimuksen mukaan on perusteltua. Esimerkiksi sähköjärjestelmien selektiivisen suojauksen tulee estää vikojen leviäminen turvallisuusluokkien välillä luotettavasti.

Kansainväliset standardit käyttävät omaa turvallisuusluokitteluaan. Standardien turvallisuusluokat voidaan kuitenkin rinnastaa vastaamaan YVL-ohjeiden turvallisuusluokkia. Tällöin useat standardit vaativat turvallisuusluokan 2 kaapeleiden erottelua fyysisesti ja toiminnallisesti muiden turvallisuusluokkien kaapeleista ja laitteista. On kuitenkin huomioitava että kyseiset standardit perustuvat N+1 –vikakriteerin turvallisuusjärjestelmiin, jolloin kyseistä vaatimusta ei ole välttämättä mielekästä noudattaa kirjaimellisesti suomalaisissa N+2 –vikakriteerin turvallisuusjärjestelmissä.

Pelkästään turvallisuusluokkiin 2, 3 ja EYT pohjautuvaa erottelua ei kuitenkaan ole välttämättä mielekästä tehdä suomalaisen ydinvoimalaitoksen kaapeloinnissa, koska siitä saatava hyöty voidaan katsoa pieneksi. Suunnittelussa tulee huomioida yhden turvallisuuslohkon sisältämien kaapelien tuhoutuminen esimerkiksi tulipalossa, jolloin jokaisen turvallisuusluokan kaapelit menetettäisiin riippumatta erottelutasosta. Lisäksi kaapeloinnin vikaantuminen on erittäin epätodennäköistä. Vikojen leviämistä eri turvallisuusluokkien välillä kaapeloinnin aktiivisen vikaantumisen kuten kaapelin itsesyttyminen takia ei tästä syystä ole välttämättä mielekästä huomioida suunnittelussa.

Turvallisuusluokkien erottelua suomalaisen ydinvoimalaitoksen kaapeloinnissa puoltaa kuitenkin syvyys-suuntaisten puolustustasojen riippumattomuuden varmistaminen. Puolustustasojen riippumattomuus paranee, jos turvallisuusluokan 2 kaapelit erotellaan muiden turvallisuusluokkien kaapeleista, koska turvallisuusluokan 2 kaapelit kuuluvat syvyys-suuntaisen puolustuksen tasolla 3 olevaan pääpuolustuslinjaan. Tästä syystä standardien vaatimusta turvallisuusluokan 2 erottelusta voisi olla hyvä soveltaa, vaikka perusteet tälle ovatkin erilaiset kuin standardeissa on ajateltu.

Johtopäätös 4, turvallisuusluokat:

Turvallisuusluokkien erottelua kaapeloinnissa tulee harkita tapauskohtaisesti. Turvallisuusluokan 2 erottamista muista turvallisuusluokista voidaan perustella syvyysuuntaisen puolustuksen tasojen riippumattomuuden varmistamisella.

7.5 Kaapeloinnin erotteluperiaatteet käytännössä

Useissa vaatimuksissa vaaditaan erottelun toteuttamista riittävällä tavalla tai niin hyvin kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista, mikä jättää tulkinnanvaraa laitoksen kaapeloinnin suunnittelijalle ja viranomaisen valvontatyölle. Kaapeloinnin erottelu on tästä syystä aina tapauskohtaisesti harkittava kokonaisuus, jossa tulee huomioida laitoksen muu suunnittelu ja kaapeloinnin tekniset ominaisuudet.

Jos erityisesti YVL-ohjeiden vaatimuksia tulkittaisiin kirjaimellisesti, voitaisiin kaapeloinnin erottelussa päätyä kuvan 33 mukaiseen niin sanottuun matriisierotteluun. Kyseisessä tapauksessa erottelua on toteutettu jokaisen syvyysuuntaisen puolustuksen tason, rinnakkaisten osajärjestelmän, jänniteluokan ja turvallisuusluokan välillä. Tällainen ratkaisu ei ole missään tapauksessa mielekäästä toteuttaa, koska tarvittavien kaapelihyllyjen määrä ja niiden tarvitsema tila kasvaisi liikaa. Kuva on vain periaatteellinen ja esimerkiksi turvallisuusluokan 2 kaapeleita tai keskijännitekaapeleita ei todennäköisesti käytetä syvyysuuntaisen puolustuksen tasolla 4.

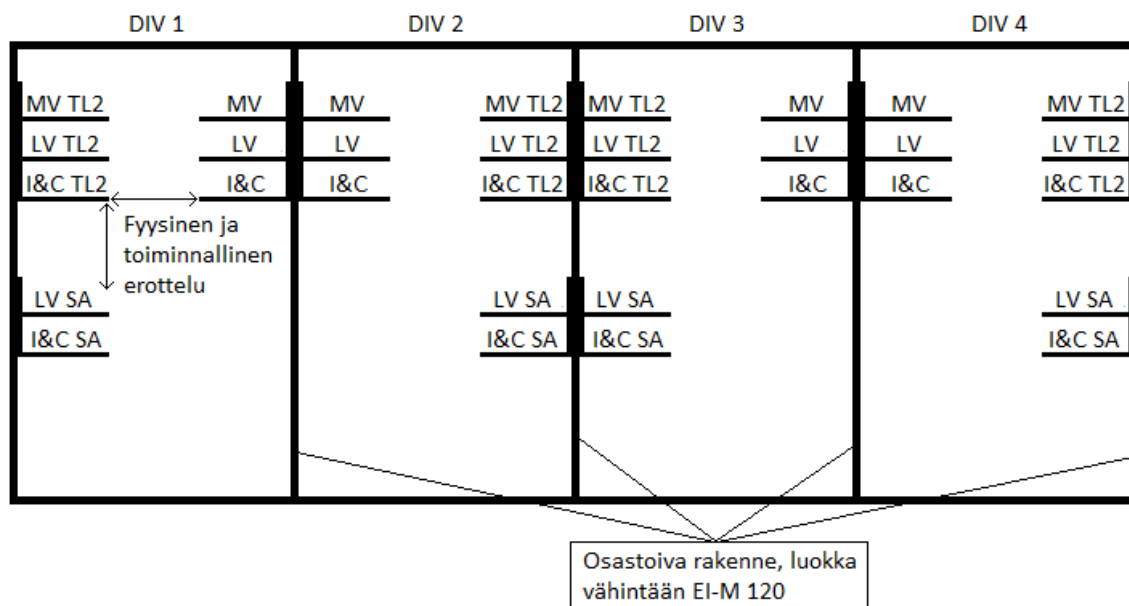
	DIV 1			DIV 2			DIV 3			DIV 4		
DID 1	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT
	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT
	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT
DID 2	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT
	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT
	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT
DID 3	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT
	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT
	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT
DID 4	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT	MV TL2	MV TL3	MV EYT
	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT	LV TL2	LV TL3	LV EYT
	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT	I&C TL2	I&C TL3	I&C EYT

Kuva 33. Esimerkki YVL-ohjeiden vaatimusten kirjaimellisesta noudattamisesta kaapeloinnin erottelussa

Kuvassa 34 on hahmotelma toteutuskelpoisemmasta YVL-ohjeiden ja standardien vaatimusten pääajatuksista huomioivasta kaapeloinnin erotteluratkaisusta. Kyseisessä esimerkissä toteutuisi käytännöllisellä tavalla:

1. Rinnakkaisten osajärjestelmien erottelu
2. Jänniteluokkien erottelu

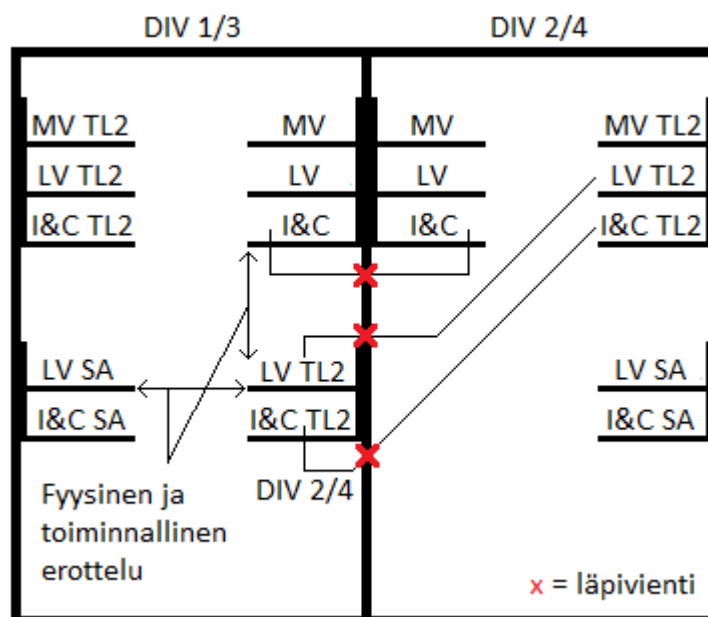
3. Vakavien onnettomuuksien hallintaan tarvittavan kaapeloinnin riippumattomuus
4. Turvallisuusluokan 2 (pääpuolustuslinjan) kaapeloinnin riippumattomuus



Kuva 34. Esimerkki vaatimustenmukaisesta kaapeloinnin erottelusta (TL2 = turvallisuusluokka 2, SA = Vakavien onnettomuuksien hallinta)

Rinnakkaisten osajärjestelmien erotteluperiaatetta täydentää kuva 35, jossa on esitetty esimerkki kaapelien viemisestä vieraaseen divisioonaan. Vieraassa divisioonassa erottelutason tulee säilyä vähintään yhtä hyvänä kuin omassakin divisioonassa. Kuvassa vieraaseen divisioonaan viedyt turvallisuusluokan 2 kaapelit on lisäksi eroteltu myös kyseisen divisioonan turvallisuusluokan 2 kaapeleista. Tällä pyritään välttämään kahden rinnakkaisen turvallisuusluokan 2 osajärjestelmän vikaantumisen saman tapahtuman seurauksena. Turvallisuusluokan 2 kaapeleita koskee tiukempi N+2 –vikakriteeri.

Kaapelien viemistä vieraaseen divisioonaan tulee edelleen pyrkiä välttämään. Esimerkiksi automaation äänestyksen suorittamiseksi kaapelien vieminen vieraaseen divisioonaan on kuitenkin välttämätöntä. Ristiinkytkennot rinnakkaisten osajärjestelmien välillä voi joissain tapauksissa myös lisätä kokonaisjärjestelmän luotettavuutta. Esimerkit eivät edusta STUKin virallista kantaa kaapeloinnin erotteluvaatimuksista tai suositelluista erotteluperiaatteista.



Kuva 35. Esimerkki kaapelien erottelusta vieraassa divisioonassa

Vaihtoehtoisena ratkaisuna voitaisiin esimerkiksi erotella turvallisuusluokan 2 ja 3 kaapelit EYT-kaapeleista. Kyseinen ratkaisu ei välttämättä tukisi yhtä hyvin syvyyssuuntaisten puolustustasojen riippumattomuutta. Sillä voitaisiin kuitenkin välttää paremmin (molempien turvallisuusluokkien 2 ja 3) turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisten osajärjestelmien vikaantuminen samasta syystä, jos turvallisuusluokkien 2 ja 3 rinnakkaisten osajärjestelmien kaapelit eroteltaisiin myös vieraassa divisioonassa toisen divisioonan kaapeleista. Myös kuvan 35 ratkaisua voitaisiin parantaa erottelemalla lisäksi turvallisuusluokan 3 kaapelit vieraassa divisioonassa toisen divisioonan kaapeleista.

Tarkemmat toimenpiteet fyysisen ja toiminnallisen erottelun toteuttamiselle kuvataan standardeissa tai ne tulee selvittää kaapeloinnin suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi standardissa IEEE 384 esitetään tarkkoja erotteluetaisyysyksiä.

Kaapeloinnin erottelussa tulee huomioida myös joitakin erikoistapauksia. Ydinvoimalaitoksen valvomon ja varavalvomon riippumattomuuden varmistamiseksi niiden kaapeleita ei saa kulkea samalla kaapelireitillä tai ne tulee erotella luotettavasti toisistaan niin, ettei sama tapahtuma pysty missään tapauksessa vahingoittamaan molempien valvomoiden kaapeleita. Lisäksi hälytys- ja palojärjestelmien kaapelointi tulee erottaa luotettavasti seurauksilta, jotka vaativat kyseisten järjestelmien toimintaa. Esimerkiksi sammutusjärjestelmän kaapelointi tulee erottaa kaikista palolähteistä, jotka voisivat vahingoittaa kaapeleita ja estää järjestelmän suunnittelunmukaisen toiminnan.

Erottelun toteuttaminen voi paikoittain olla hankalaa. Tällaisia paikkoja voivat olla erityisesti valvomo ja suojarakennus, joissa kaikkien divisioonien kaapeleita voi olla välttämätöntä viedä tiheästi samalla alueella. Tällöin erottelun riittävä toteutuminen voidaan varmistaa esimerkiksi tekemällä suojarakennuksen läpiviennit mahdollisimman etäälle

toisistaan, valvomon pulpettien osastoinnilla, valvomon alapuolisen kaapelitilan varustamisella automaattisilla palontorjuntajärjestelmillä ja valvomon ympärivuorokautisella miehittämisellä.

Kaapeloinnin erottelussa, kuten koko ydinvoimalaitoksen suunnittelussa, on huomioitava myös mahdollinen yhteisvikaantuminen. Kaapeloinnin erottelun parantaminen on yksi näkökulma yhteisvikojen torjumisessa. Yhteisviat voivat johtua järjestelmien yllättävistä riippuvuussuhteista, joita ei suunnittelussa osata huomioida. Tällöin kaapeloinnin erottelutason parantaminen yli sen, mikä yleisten turvallisuusperiaatteiden mukaan olisi välttämätöntä, voisi olla yksi yhteisvikoja ehkäisevä toimenpide. Kaapeloinnissa todennäköisin yhteisvikojen aiheuttaja lienee sähkömagneettiset häiriöt.

Loppu viimein kaapeloinnin erottelu tulee aina suhteuttaa muuhun laitossuunnitteluun. Kaapelointi ei tukijärjestelmänä itsessään suorita mitään turvallisuustoimintoja, minkä takia erottelusta saatu hyöty ydinturvallisuudelle riippuu vahvasti varsinaisen turvallisuustoiminnon suorittavan järjestelmän tai laitteen suunnittelusta. Ohjeessa YVL B.1 vaaditaan, että:

”Järjestelmän moninkertaisuusperiaatetta toteuttavien osien erotteluvaatimus koskee myös kaikkia turvallisuustoiminnon toteuttamiseen tarvittavien järjestelmien tukijärjestelmiä sekä kaikkia turvallisuustoimintoa ohjaavia automaatiojärjestelmiä toiminnon käynnistystarpeen osoittavasta mittauksesta aina turvallisuustoiminnon toteuttaville laitteille asti.”

Kaapelointi ei siis saa muodostaa niin sanotusti heikkoa lenkkiä turvallisuustoiminnon suorittamiseen liittyvässä ketjussa, mutta myös liian hyvän erottelutason toteuttamisen hyödyt kaapeloinnissa saturoituvat nopeasti, jos muu laitossuunnittelu ei ole samalla tasolla.

8. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tukea STUKin viranomaisvalvontatyötä koskien tulevien suomalaisten ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erotteluperiaatteita. Tavoitteeseen päästiin esittelemällä olennaiset ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erottelua koskevat kansalliset ja kansainväliset vaatimukset sekä perusteet vaatimusten toteuttamiselle käytännössä. Vaatimusten perusteita selventävät taustatyönä tehty selvitys ydinvoimalaitosten suunnittelusta ja kaapeloinnin tekniikasta.

Työssä tutkituista vaatimuslähteistä tunnistettiin neljä erotteluperiaatetta, joita tulisi soveltaa ydinvoimalaitosten kaapeloinnin erottelussa:

1. Syvyys-suuntaisten puolustustasojen erottelu
2. Rinnakkaisten osajärjestelmien erottelu
3. Jänniteluokkien erottelu
4. Turvallisuusluokkien erottelu

Näistä varsin selkeitä vaatimusten ja käytännön toteutuksen puolesta ovat rinnakkaisten osajärjestelmien ja jänniteluokkien erottelu. Rinnakkaisten osajärjestelmien erottelulla tulee luotettavasti rajoittaa vikojen ja erilaisten sisäisten ja ulkoisten tapahtumien vaikutukset kerrallaan yhteen rinnakkaiseen osajärjestelmään tai laitossosaan. Jänniteluokkien erottelulla estetään sähkömagneettisten häiriöiden leviäminen.

Enemmän tapauskohtaista harkintaa vaativat syvyys-suuntaisten puolustustasojen ja turvallisuusluokkien erottelu. Syvyys-suuntaisten puolustustasojen riippumattomuuden varmistaminen on korostunut viime aikoina ydinturvallisuusajattelussa. Ajatuksella halutaan parantaa ydinturvallisuutta, jotta esimerkiksi Fukushima Dai-ichin 2011 vuoden tapahtumat eivät toistuisi. IAEA:n standardit ja YVL-ohjeet painottavat erityisesti syvyys-suuntaisen puolustustason 4 eli vakavien onnettomuuksien hallintaan käytettävien järjestelmien riippumattomuuden varmistamista fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla.

Useat standardit vaativat turvallisuusluokan 2 kaapeleiden erottelua muista turvallisuusluokista. Standardien vaatimusta ei kuitenkaan välttämättä ole mielekästä noudattaa suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla, koska standardien muu vaatimustaso poikkeaa suomalaisesta käytännöstä. Toisaalta turvallisuusluokan 2 kaapeleiden erottelulla saataisiin eroteltua pääpuolustuslinjan turvallisuusluokan 2 järjestelmät muista järjestelmistä, mikä auttaisi syvyys-suuntaisten puolustustasojen riippumattomuuden varmistamisessa. Kansallisten YVL-ohjeiden vaatimuksissa on tulkinnanvaraa.

LÄHTEET

- [1] M. Saukkonen, Kaapeloinnin erotteluratkaisut suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla, 2017.
- [2] Ydinenergialaki, 990/1987, 1987. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990>.
- [3] YVL B.1, Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 45 s.
- [4] IAEA SSR-2/1, Safety of Nuclear Power Plants: Design, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016, 99 s.
- [5] J. Sandberg, Ydinturvallisuus, Kirjasarja: Säteily- ja ydinturvallisuus, 1. painos. Säteilyturvakeskus, Hämeenlinna, 2004, 418 s.
- [6] Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta, STUK Y/1/2016, 2016. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/42423/STUK-Y-1-2016.fi.pdf>.
- [7] Fennovoima, Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitoksen rakentamislupahakemus, 2015, 180 s. Saatavissa: https://issuu.com/fennovoima/docs/rakentamislupahakemus_web.
- [8] Teollisuuden Voima Oyj, Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3, 64 s. Saatavissa: http://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf.
- [9] YVL B.3, Ydinvoimalaitoksen deterministiset turvallisuusanalyysit, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 13 s.
- [10] YVL B.2, Ydinlaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 10 s.
- [11] S. Hankivuo, Yhteisvikojen syntymisen estäminen ydinvoimalaitosten sähköjärjestelmissä sähköverkon häiriöissä, Diplomityö, 2011, 98 s. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/20788/hankivuo.pdf?sequence=3>.
- [12] YVL B.1, Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu, perustelumuuisto, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2015, 29 s.
- [13] Reka Kaapeli Oy, Keskijännitekaapelit, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 10.1.2017): <http://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit>.
- [14] Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Voimakaapelien valinta ja asennus, Insinööritieto Oy, 1978, 290 s.
- [15] P. Alatalo, Voimakaapelit ja asennusjohdot, Oy Nokia Ab Kaapelitehdas, Espoo, 1975, 167 s.

- [16] Pistesarjat Oy, N2XCH asennuskaapeli 0,6/1 kV, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 27.1.2017): <https://www.pistesarjat.fi/files/pdf/pyro/N2XCH.pdf>.
- [17] SFS-IEC 60050-461, Sähköteknillinen sanasto. Osa 461: Energiakaapelit, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2009, 82 s.
- [18] Reka Kaapeli Oy, Ohjauskaapelit, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 23.1.2017): <http://www.reka.fi/ohjaus-ja-instrumentointikaapelit/ohjauskaapelit>.
- [19] Reka Kaapeli Oy, Instrumentointikaapelit, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 23.1.2017): <http://www.reka.fi/ohjaus-ja-instrumentointikaapelit/instrumentointikaapelit>.
- [20] Prysmian Group, RG-Cables: RG59, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 27.1.2017): http://www.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/multimedia/downloads/datasheets/hf24e.pdf.
- [21] Pistesarjat Oy, Palonkestävät kuidut, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 27.1.2017): <https://www.pistesarjat.fi/fi/tuotteet/tuote/tietoliikennetuotteet/10192/palonkestavat-kuidut>.
- [22] STK-Tietopalvelu Oy, Telekaapeli sisä - KLM 4X0,8 R100 - Hedtec, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 27.1.2017): <http://www.sahkonumerot.fi/0270886/>.
- [23] H.W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, 1. painos. John Wiley & Sons, New Jersey, 2009, 731 s.
- [24] J. Uusitalo, SMG-5250 Sähkömagneettinen yhteensopivuus, EMC, TTY, Elektro-
niikan laitos, Tampere, 2009, 74 s.
- [25] C.R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2. painos. John Wiley & Sons, New Jersey, 2006, 1013 s.
- [26] ABB Oy, Teknisiä tietoja ja taulukoita, 9. painos. Vaasa, 2000, 626 s.
- [27] Ningo Bonet Metal Products Co., Ltd., Ladder Cable Tray, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 13.1.2017): <https://www.cnbonet.com/templets/bonet/images/product/ladder/l08.jpg>.
- [28] IEC 61000-5-2, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 2: Earthing and cabling, International Electrotechnical Commission, Geneva, 1997, 140 s.
- [29] Aurecon, Deconstruction of 91 Hereford Street, Christchurch, New Zealand, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 16.1.2017): <http://www.aurecongroup.com/en/projects/data-and-telecommunications/deconstruction-91-hereford-st-christchurch.aspx>.
- [30] Control Technologies FZE, Server room raised floor, Verkkosivu. Saatavissa (luettu 16.2.2017): <http://www.raisedflooruae.com/server-room-flooring>.

- [31] YVL B.6, Ydinvoimalaitoksen suojarakennus, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 10 s.
- [32] I. Autio, Hyvä asennustapa sähkötöissä, Sähkötieto Ry, Espoo, 2001, 142 s.
- [33] IEEE 690, Standard for the Design and Installation of Cable Systems for Class 1E Circuits in Nuclear Power Generating Stations, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2004, 19 s.
- [34] Teollisuuden Voima Oyj, Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitosyksikön käyttölupahakemus, Helsinki, 2016, 232 s. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2850909/K%C3%A4ytt%C3%B6lupahakemus>.
- [35] YVL B.7, Varautuminen sisäisiin ja ulkoisiin uhkiin ydinlaitoksessa, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 26 s.
- [36] H. Aulamo, Ydinvoimalaitoksen kaapelipaloriski, STUK-YTO-TR 141, 1998, 80 s. Saatavissa: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/024/29024809.pdf.
- [37] IEC 60709, Nuclear power plants - Instrumentation and control systems important to safety - Separation, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2004, 48 s.
- [38] Säteilyturvakeskus, Selvitys varautumisesta ulkoisiin tapahtumiin suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla, Helsinki, 2011, 9 s. Saatavissa: http://www.stuk.fi/documents/12547/256417/2_TEM-selvitysraportti.pdf/2ac6e89a-2de8-460c-a0e7-3759c307af71.
- [39] YVL A.11, Ydinlaitoksen turvajärjestelyt, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 31 s.
- [40] Säteilyturvakeskus, Selvitys varautumisesta ulkoisiin tapahtumiin suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla, Liite 2: Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat, Helsinki, 2011, 12 s. Saatavissa: http://www.stuk.fi/documents/12547/256417/4_TEM-selvitysraportti_Liite2.pdf/2b6242f8-0090-4f9a-ad7a-b14c55af630e.
- [41] Säteilyturvakeskus, Selvitys varautumisesta ulkoisiin tapahtumiin suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla, Liite 1: Fukushima Dai-ichin ydinvoimalaitoksen onnettomuus, Helsinki, 2011, 4 s. Saatavissa: http://www.stuk.fi/documents/12547/256417/3_TEM-selvitysraportti_Liite1.pdf/e98e8fa5-c99c-4f67-99a7-0a5865707efe.
- [42] Valtioneuvoston asetus, 717/2013, 2013. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130717>.
- [43] YVL E.7, Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 34 s.
- [44] YVL B.8, Ydinlaitoksen palontorjunta, Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013, 27 s.
- [45] IAEA SSG-34, Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016, 144 s.

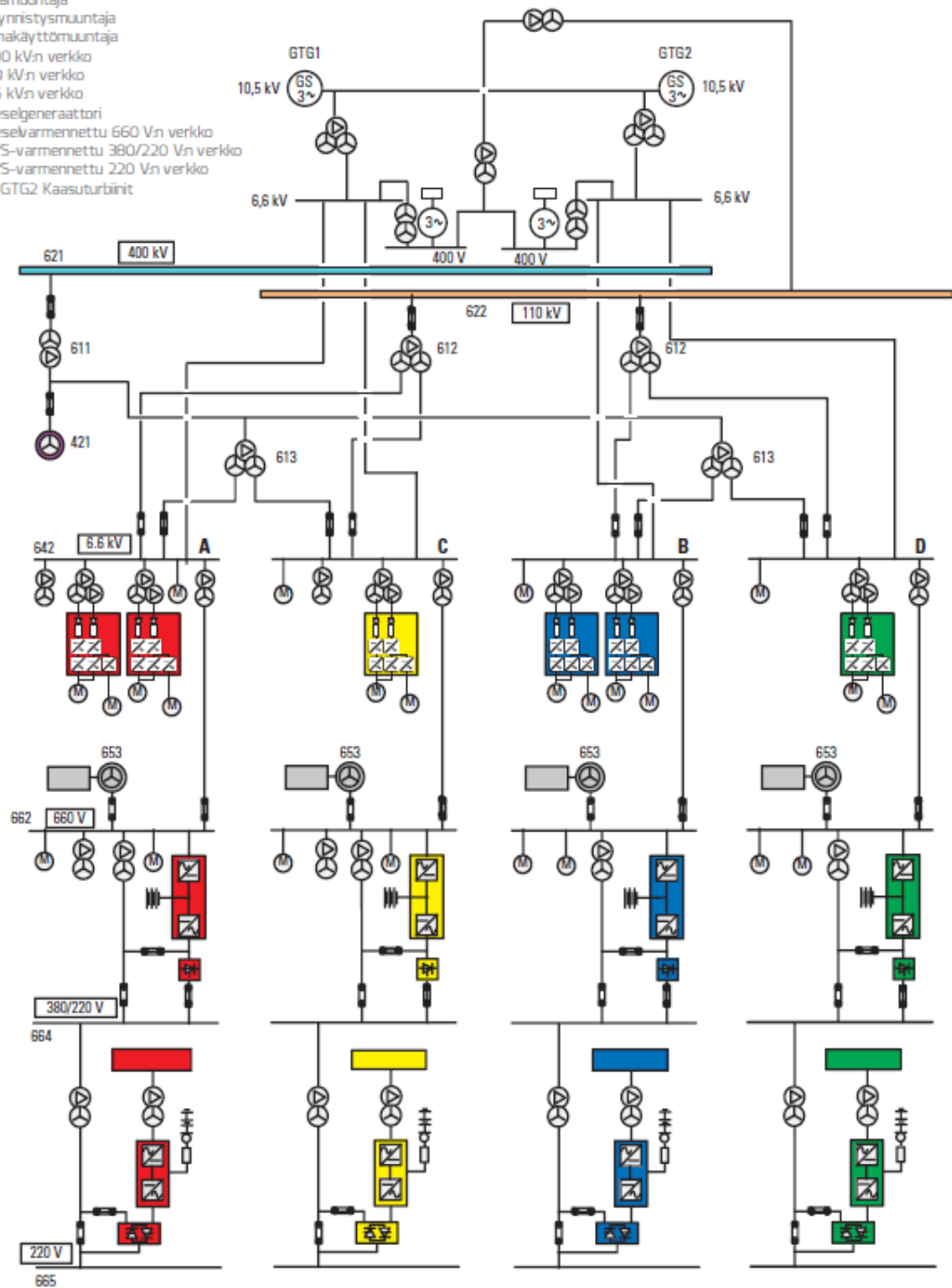
- [46] IAEA SSG-39, Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016, 184 s.
- [47] DeYoung et. al., Cable Separation - What Do Industry Testing Programs Show? IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 3, September 1990, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., ss. 585-602.
- [48] IEEE 384, Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2008, 39 s.
- [49] IEC 61226, Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - Classification of instrumentation and control functions, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2009, 68 s.
- [50] KTA 3701, General Requirements for the Electrical Power Supply in Nuclear Power Plants, Kerntechnischer Ausschuss, Salzgitter, 1999, 19 s.
- [51] KTA 3705, Switchgear, Transformers and Distribution Networks for the Electrical Power Supply of the Safety System in Nuclear Power Plants, Kerntechnischer Ausschuss, Salzgitter, 2006, 18 s.
- [52] KTA 3501, Reactor Protection System and Monitoring Equipment of the Safety System, Kerntechnischer Ausschuss, Salzgitter, 2006, 24 s.
- [53] Teollisuuden Voima Oyj, Olkiluoto 1- ja 2 -ydinvoimalaitosyksiköiden käyttöluo-
hakemus, Helsinki, 2017, 184 s. Saatavissa: <http://tem.fi/olkiluoto-1-ja-2-kayttolupa>.

LIITE A: OLKILUOTO 1 JA 2 -YKSIKÖIDEN PÄÄKAAVIO [53]

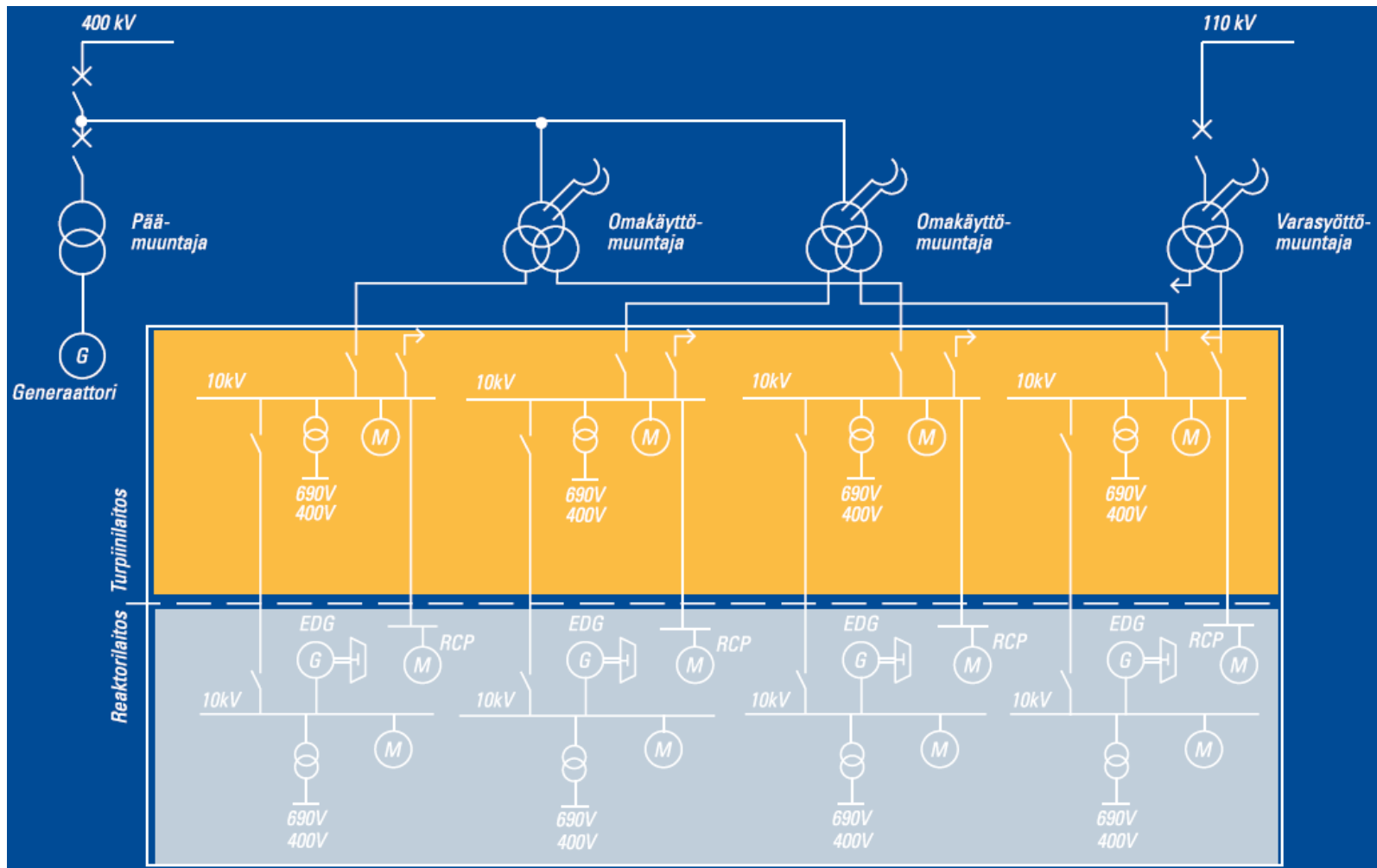
OMAKÄYTTOSÄHKÖVERKKO JA ULKOISET VERKKOYHTEYDET

- osajärjestelmä A
- osajärjestelmä B
- osajärjestelmä C
- osajärjestelmä D

- 421 Generaattori
- 611 Päämuuntaja
- 612 Käynnistysmuuntaja
- 613 Omakäyttömuuntaja
- 621 400 kV:n verkko
- 622 110 kV:n verkko
- 642 6,6 kV:n verkko
- 653 Dieselgeneraattori
- 662 Dieselvarmennettu 660 V:n verkko
- 664 UPS-varmennettu 380/220 V:n verkko
- 665 UPS-varmennettu 220 V:n verkko
- GTG1 ja GTG2 Kaasuturbiinit



LIITE B: OLKILUOTO 3 -YKSIKÖN PÄÄKAAVIO [8]



LIITE C: DIDELSYS – SYVYSSUUNTAINEN PUOLUSTUS SÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ

Ydinvoimalaitoksen turvallisuustoiminnot ovat yleensä erittäin riippuvaisia luotettavasta sähkönsyötöstä jokaisella syvyysuuntaisen puolustuksen tasolla. Sähköjärjestelmien syvyysuuntainen puolustus muodostuu useasta päällekkäisestä toisiaan korvaavasta järjestelmästä, jotka yhdessä muodostavat laitoksella tarvittavan luotettavan ja vahvan sähköjakelun. Syvyysuuntaisen puolustuksen toteuttaminen ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmissä on tiivistetysti kuvattu taulukossa 10.

Taulukko 10. DIDELSYS

Puolustustaso		Tehtävät	Sähköjärjestelmät
1	Ennalta ehkäiseminen	Varmistetaan laitoksen virheetön toiminta konservatiivisella suunnittelulla ja korkean laatu-tason noudattamisella.	Kattavat suunnitteluperusteet, luotettava kantaverkko, luotettava omakäyttösähköverkko, DC-apusähkö
2	Häiriötilanteiden hallinta	Havaitaan häiriöt, korjataan tilanne ja estetään häiriöiden laajeneminen onnettomuuksiksi.	Luotettava selektiivinen suojaus, omakäyttö, syötönvaihtoautomaatiikka
3	Onnettomuuksien hallinta	Turvataan luotettavasti toimivilla turvallisuustoiminnoilla radioaktiivisten aineiden leviämisen estävien fyysisten esteiden eheys ja estetään vakavat polttoainevauriot.	Luotettavat sähköjärjestelmät turvallisuustoiminnoille, hätä-dieselgeneraattorit, SBO - dieselgeneraattorit
4	Vakavien onnettomuuksien hallinta	Rajoitetaan vakavien onnettomuuksien vaikutuksia ja säilytetään tilannetieto luotettavilla mittauksilla.	Itsenäiset sähköjärjestelmät kriittisten toimenpiteiden suorittamiseksi, SA-akusto, varavoimalaitokset, varayhteydet
5	Seurausten lieventäminen	Lievennetään radioaktiivisten päästöjen seurauksia hätä- ja valmiusjärjestelyillä.	Liikuteltavat teholähteet

TASO 1 - ENNALTA EHKÄISEMINEN

Suunnitteluperusteet

Kattavat suunnitteluperusteet muodostavat perustan luotettavan ja vahvan omakäyttösähköverkon toiminnalle. Suunnitteluperusteissa tulee huomioida sähköjärjestelmien jännitteen ja taajuuden vaihteluvälit, transienttitapahtumat ja niiden dynaamiset tai jatkuvat muutokset sekä sisäiset ja ulkoiset uhkat, jotka voivat vaarantaa laitoksen sisäistä sähköjakelua. Ydinvoimalaitos tuottaa myös itse sähköä, mikä johtaa erilaisiin jännite- ja taajuusvaihteluihin kuin konventionaalisessa teollisuudessa. Vaillinaiset suunnitteluperusteet johtavat käyttötarkoitukseensa puutteellisten laitteiden käyttöön, jota redun-

danttisuus ja diversiteetti eivät korvaa. Hyvillä varmuusmarginaaleilla varmistetaan sähköjärjestelmien toiminta myös äärimmäisissä poikkeustilanteissa.

Kantaverkko

Kantaverkko on osa normaaleja teholähteitä, yhdessä laitoksen oman päägeneraattorin kanssa, joilla syötetään omakäyttösähköverkkoa ja sen turvallisuusjärjestelmiä. Luotettavalla ja toimivalla kantaverkolla on tätä kautta merkittävä vaikutus laitoksen turvallisuudelle kaikissa käyttötilanteissa. Kantaverkkoyhteys toimii yhteisenä pisteenä kaikille ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmille, minkä takia kantaverkosta tulevilta häiriöiltä täytyy suojautua luotettavasti.

Omakäyttösähköverkko

Ydinvoimalaitoksen omakäyttösähköverkon osat ovat yhteydessä toisiinsa, jolloin häiriöt ja viat pelkästään normaalikäyttöön suunnitelluissa järjestelmissä voivat päästä vaikuttamaan myös turvallisuustoimintoja suorittaviin järjestelmiin. Tästä syystä suunnittelussa on käytettävä korkeaa laatutasoa, joka varmistetaan kansallisia ja kansainvälisiä standardeja ja ohjeita noudattamalla. Yhteisvikojen mahdollisuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota, koska normaalikäytössä omakäyttösähköverkon redundantit divisioiden osat ovat yhteydessä samaan teholähteeseen (kantaverkko). Yhteisvioletta suojautuminen diverseillä teholähteillä on elintärkeää turvallisuustoimintojen varmistamiseksi. Omakäyttösähköverkon käyttökuntoisuus tulee varmistaa kattavalla kunnossapito-ohjelmalla.

Tasasähköjärjestelmät

Tasasähköjärjestelmien syöttämä DC-apusähkö on elintärkeää kaikille ydinvoimalaitoksen sähköjärjestelmille ja niiden luotettavuudelle. Apusähköä tarvitaan kaikkien kytkentätoimenpiteiden suorittamiseen niin normaalikäytössä kuin häiriö- ja onnettomuustilanteissakin. Kaikkien vaihtosähköteholähteiden vikaantuessa ovat tasasähköjärjestelmien akustot elintärkeitä vaihtosähköteholähteiden palauttamisessa takaisin käyttöön. Tästä syystä häiriöiden välittyminen tasasähkölaitteita syöttävästä vaihtosähköverkosta tulee estää luotettavasti esimerkiksi moottorigeneraattori-erottajalla tai staattisella erotuksella.

TASO 2 - HÄIRIÖTILANTEIDEN HALLINTA

Selektiivinen suojaus

Sähköjärjestelmien selektiivisen suojauksen tulee erottaa häiriötilanteissa pelkästään vikaantuneen verkon osan jännitteettömäksi. Suojauksen toimiminen varmistetaan varasuojilla, jos primäärinen suojaustoiminto tai –laite vikaantuu. Luotettavasti toimiva selektiivinen suojaus estää häiriöiden leviämisen useampaan verkon osaan, mikä estää

tilanteen laajentumisen onnettomuudeksi ja mahdollistaa palaamisen normaaliin käyttötoimintaan.

Omakäyttö

Jos laitoksen primäärinen (400 kV) kantaverkkoyhteys vikaantuu, täytyy laitoksella olla mahdollisuus siirtyä omakäyttöön. Omakäytölle siirtyminen lisää yhden syvyysuuntaisen puolustuksen tason ja parantaa laitoksen käytettävyyttä sähköntuotantoon. Omakäytölle siirtyminen on kuitenkin vaativa prosessi, koska reaktori ja höyryprosessi joudutaan ajamaan nopeasti omakäytön vaatimalle tehotasolle. Siirtymisestä on vain vähän käyttökokemuksia eikä sen onnistuminen ole aina taattua.

Syötönvaihtoautomaatiikka

Omakäyttösähköverkkoa varten on oltava kaksi yhteyttä kantaverkkoon, jotka on suunniteltu ja sijoitettu mahdollisimman hyvin niin, että molempien yhtäaikainen vikaantuminen minimoidaan. Jos primäärinen (400 kV) yhteys vikaantuu ja omakäytölle siirtyminen epäonnistuu, huolehtii syötönvaihtoautomaatiikka siirtymisestä sekundääriseen (110 kV) kantaverkkoyhteyteen. Sekundäärisen kantaverkkoyhteyden tehtävänä on varmistaa turvallisuustoimintojen toteutuminen. Syötönvaihdon seuraukset kiskostojen ja moottoreiden jännitteelle, vaihekulmalle ja taajuudelle tulee analysoida suunnittelussa.

TASO 3 - ONNETTOMUUSTILANTEIDEN HALLINTA

Hätädieselgeneraattorit (DBC 3/4)

Syötön katketessa kantaverkosta ja päägeneraattorilta, kytketään suuri osa kuormista irti ja laitoksen hätädieselgeneraattorit (EDG) käynnistyvät automaattisesti. Hätädieselgeneraattoreita on yksi jokaisessa divisioonassa. Hätädieselit kytketyvät syöttämään omakäyttösähköverkkoa saavuttaessaan 50 Hz taajuuden. Tämän jälkeen automaattiset kytkentäsekvenssit kytkvät turvallisuustoimintoihin osallistuvat kuormat osissa takaisin verkkoon. Hätädieselgeneraattorit suojataan luotettavista uhilta, jotka voivat vioittaa kantaverkon ja päägeneraattorin.

SBO-dieselgeneraattorit (DEC)

Oletettujen onnettomuuksien laajennuksiin (DEC) varaudutaan SBO-dieselgeneraattoreilla, jolloin myös hätädieselgeneraattorit ovat vikaantuneet (vaihtosähkön menetys, station blackout). Normaalisti SBO-dieselgeneraattorit on kytketty irti verkosta ja tarvittaessa ne käynnistetään ja kytketään manuaalisesti. Tällä tavoin SBO-dieselgeneraattorit suojataan yhteisvialta, joka saattaisi vikaannuttaa molemmat dieselgeneraattorit (EDG ja SBO). SBO-dieselgeneraattoreita ei tästä syystä saada yhtä nopeasti käyttöön kuin hätädieselgeneraattoreita.

Sähköturvallisuusjärjestelmät

Sähköturvallisuusjärjestelmät vastaavat turvallisuustoimintoihin osallistuvien kuormien sähkönsyötöstä. Kuormien päätehtävänä on varmistaa radioaktiivisten aineiden leviämistä estävien fyysisten esteiden eheys ja estää radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön.

Kantaverkon tai päägeneraattorin vikaantuminen voi johtaa merkittäviin ylijännitteiden seurauksena yhteisvikoihin redundanttisten turvallisuusjärjestelmien ollessa niihin yhtäaikaaisesti yhteydessä. Riittävät vastatoimenpiteet suunnittelussa, asennuksessa ja käytössä yhteisvikojen välttämiseksi ovat tästä syystä elintärkeitä. Omakäyttösähköverkon ollessa erotettu kantaverkosta ja päägeneraattorista, yhteisvikojen mahdollisuus on merkittävästi pienentynyt, koska jokainen sähkönjakelun divisioona on tällöin eroteltu toisistaan. Tällöin vaillinaiset suunnitteluperusteet nousevat merkittävimmäksi yhteisvikojen aiheuttajaksi. Identtisten komponenttien yhteisvikaantuminen voidaan sulkea pois, jos:

- a) Komponentit suorittavat eri toimenpiteen (ensimmäisen järjestelmän katkaisija sulkeutuu ja toisen järjestelmän katkaisija avautuu)
- b) Komponenteilla on eri toimintatila (yksi kahdesta rinnakkaisesta suuntaajasta on käytössä ja toinen poissa käytöstä).

TASO 4 - VAKAVIEN ONNETTOMUUKSIEN HALLINTA

Varavoimulaitokset

Suomalaisten ydinvoimlaitosten omakäyttösähköverkon sähkön saanti on osaltaan varmistettu myös varavoimlaitoksilla, jotka voivat olla esimerkiksi vesivoima- tai kaasuturbiinilaitoksia. Varavoimlaitokset voidaan kytkeä manuaalisesti syöttämään omakäyttösähköverkkoa aina tilanteen vaatiessa.

SA-akusto

Vakavien onnettomuuksien hallintaan varaudutaan sähköjärjestelmissä SA-akustoilla. SA-akustot toimivat viimeisenä teholähteenä, jos kaikki edeltävät puolustustasot ovat pettäneet. SA-akustojen tehtävänä on syöttää vakavien onnettomuuksien hallinnassa tarvittavia kaikista kriittisimpiä laitteita, jotka rajoittavat radioaktiivisten aineiden vapautumista sekä tarjoavat ohjaajille kriittistä mittaustietoa reaktorin tilasta.

Varayhteys

Jos samalla laitosalueella on useampia ydinvoimalaitosyksiköjä, tulee niiden välillä olla varayhteys, jota kautta voidaan syöttää naapuriyksikön omakäyttösähköverkkoa. Varayhteys tarjoaa pienen mahdollisuuden saada kriittisissä tilanteissa sähköä naapuriyksiköstä. Vikojen leviäminen varayhteyttä pitkin tulee estää.

TASO 5 - SEURAUSTEN LIEVENTÄMINEN

Liikuteltavat teholähteet

Vakavan reaktorionnettomuuden seurausten lieventämiseen varaudutaan liikuteltavilla teholähteillä, joilla voidaan syöttää laitosalueen säämastoa sekä esimerkiksi valmiuskeskusta ja varastorakennuksia korjaavien toimenpiteiden nopeuttamiseksi. Säämaston avulla saadaan tietoa vallitsevista sääolosuhteista, minkä avulla voidaan arvioida radioaktiivisten aineiden leviämissuunta ja aloittaa tarvittavat evakuoinnit.

ESIMERKKI PUOLUSTUSTASOISTA

Käytännössä suomalaisen ydinvoimalaitoksen sähkönjakelun eri puolustustasot voisivat näyttää esimerkiksi seuraavalta:

Vaihtosähkönjakelu:

1. 400 kV –verkkoyhteys
2. Omakäyttö laitoksen päägeneraattorilla
3. 110 kV –verkkoyhteys
4. 4 x hätädieselgeneraattori (TL2) (N+2 –vikakriteeri)
5. 2 x SBO-dieselgeneraattori (TL3) (N+1 –vikakriteeri)
6. Varavoimalaitos 1 (esim. kaasuturbiinilaitos)
7. Naapuriyksiköt
8. Varavoimalaitos 2 (esim. lähistöllä oleva vesivoimalaitos, joka voidaan erottaa syöttämään pelkästään ydinvoimalaitosyksikköä)

Tasasähkönjakelu:

1. Ylläpitovarauksessa oleva akusto
2. Varauksesta purkautuva akusto
3. Tasasuuntaajat ilman akustoa

LIITE D: YVL-OHJEIDEN VAATIMUKSET KAAPELOINNIN EROTTELULLE

Taulukko 11. Yhteenveto YVL-ohjeiden vaatimuksista kaapeloinnin erottelulle

Lähde	Vaatus	Tulkinta
YVL B.1 #425	Valtioneuvoston asetuksen (717/2013) 12 §:n mukaan syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen puolustustasojen on oltava toisistaan niin riippumattomia kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista saavuttaa. Yhden puolustustason menetys ei saa heikentää muiden puolustustasojen toimintaa.	Syvyysuuntaisen puolustuksen eri tasojen kaapelointien riippumattomuus on varmistettava riittävällä fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla.
YVL B.1 #426	Riippumattomuuden on perustuttava toiminnallisen erottelun, erilaisuusperiaatteen sekä fyysisen erottelun riittävään soveltamiseen puolustustasojen välillä.	
YVL B.1 #427	Riippuvuus turvallisuustoimintoja syvyysuuntaisen puolustuksen eri tasoilla tukevista järjestelmistä on otettava huomioon. Riippuvuus ei saa tarpeettomasti heikentää syvyysuuntaisen puolustuksen luotettavuutta.	
YVL B.1 #429	Syvyysuuntaisen turvallisuusperiaatteen mukaan eri puolustustasojen toteuttamiseen tarvittavat järjestelmät on erotettava toisistaan toiminnallisesti siten, että yhdellä tasolla sattuva toimintahäiriö tai vikaantuminen ei etene muille tasoille.	
YVL B.1 #430	Syvyysuuntaisen puolustuksen eri tasoilla käytettävät järjestelmät ja laitteet on erotettava saman turvallisuuslohkon sisällä toisistaan etäisyydellä tai suojaavilla rakenteilla, jos on olemassa ilmeinen mahdollisuus seurausvikoihin, jotka aiheutuvat toisella tasolla olevan järjestelmän tai laitteen vikaantumisesta.	
YVL B.1 #431	Vakavien onnettomuuksien hallintaan tarkoitettut järjestelmät (syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen taso 4) on erotettava toiminnallisesti ja fyysisesti normaaliin käyttöön, häiriötilanteisiin ja oletettujen onnettomuuksien sekä oletettujen onnettomuuksien laajennustilanteiden hallin-	Syvyysuuntaisen puolustuksen tason 4 kaapeloinnin riippumattomuus on varmistettava fyysisellä ja toiminnallisella erottelulla.

	taan tarkoitetuista järjestelmistä (tasot 1, 2 ja 3a sekä 3b). Vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaan syvyyspuolustuksen tasolla 4 tarkoitettuja järjestelmiä voi perustellussa tapauksessa käyttää myös vakavien sydänvaurioiden estämiseen oletettujen onnettomuuksien laajennustilanteissa, mikäli tämä ei vaaranna järjestelmien kykyä hoitaa varsinainen tehtävänsä tilanteen mahdollisesti kehittyessä vakavaksi reaktorionnettomuudeksi.	
YVL B.1 #5415	Vakavien reaktorionnettomuuksien hallintajärjestelmän käyttöenergian (sähkö, paineilma jne.) syöttöjen on oltava riippumattomia laitosesikön muista syöttölähteistä ja käyttöenergianjakelujärjestelmistä.	
YVL B.1 #5240/8	Vakavien reaktorionnettomuuksien hallintaan käytettävän instrumentoinnin ja ohjausjärjestelmien on oltava riippumattomia laitoksen muista automaatiojärjestelmistä. Muiden automaatiojärjestelmien vikaantuminen ei saa häiritä vakavien onnettomuuksien hallintatoimenpiteitä.	
YVL B.1 #434	Turvallisuustoimintoja toteuttavan järjestelmän moninkertaisuusperiaatetta toteuttavat osat on sijoitettava eri turvallisuuslohkoihin.	Turvallisuusjärjestelmien rinnakkaisten osajärjestelmien kaapeloinnit on sijoitettava eri turvallisuuslohkoihin.
YVL B.1 #435	Turvallisuustoimintoja toteuttavan järjestelmän yhden osajärjestelmän vikaantuminen ei saa aiheuttaa toisen saman järjestelmän moninkertaisuusperiaatetta toteuttavan osajärjestelmän eikä estää minkään samaan turvallisuustoimintoon osallistuvaa muuta järjestelmää toteuttamasta turvallisuustoimintoaan.	Turvallisuusjärjestelmän yhden osajärjestelmän kaapelointi ei saa vikaantua toisen saman turvallisuusjärjestelmän osajärjestelmän vikaantumisesta eikä estää minkään samaan turvallisuustoimintoon osallistuvaa muuta järjestelmää toteuttamasta turvallisuustoimintoaan.
YVL B.1 #440	Eri turvallisuusluokkiin kuuluvat järjestelmät ja laitteet on erotettava toisistaan toiminnallisesti siten, että alemman turvallisuusluokan järjestelmän, rakenteen tai laitteen toimintatapa tai vikaantuminen ei aiheuta ylemmässä turvallisuusluokassa olevan järjestelmän, rakenteen tai laitteen vikaantumista eikä toiminnan menetystä.	Eri turvallisuusluokkien kaapeloinnit ja laitteet on riittäväällä tavalla erotettava toiminnallisesti toisistaan.
YVL B.1 #442	Vikakriteeriä on sovellettava turvallisuusjärjestelmästä ja kaikista turvallisuustoiminnon toteuttamiseen tarvittavista tukijärjestelmistä koostuvaan järjestelmäkokonaisuuteen. Tällaisia tukijärjestelmiä ovat esim. laitteiden jäähdytys ja sähkön syöttö sekä näitä toimintoja ohjaavat jär-	Turvallisuusjärjestelmän kaapeloinnin ja sen erottelun on vastattava varsinaisen turvallisuusjärjestelmän vikakriteeriä. Vikakriteeri voi olla N+2 tai N+1 –tyyppinen.

	jestelmät. Vikakriteerinä on käytettävä joko (N+2)- tai (N+1)-vikakriteeriä siten, kuin tässä ohjeessa esitetään.	
YVL B.1 #445	Reaktorissa on oltava kiinteitä neutroniabsorbaattoreita käyttävä pikasulkujärjestelmä, joka yksinään tai yhdessä jäähdytteenmenetystilanteiden varalta suunniteltujen järjestelmien lisäämän reaktiivisuusmyrkyn kanssa pystyy pysäyttämään reaktorin hallittuun tilaan ja pitämään sen pitkäaikaisesti alikriittisenä minkä tahansa odotettavissa olevan käyttöhäiriön tai oletetun onnettomuuden jälkeen siten, että polttoaineen eheydelle, radiologisille vaikutuksille ja primääripiirin paineelle ao. suunnitteluperusteluokassa DBC2, DBC3 tai DBC4 asetetut raja-arvot eivät ylitä. Neutroniabsorbaattoreiden työntämisessä reaktorisydämeen tulee käyttää hyväksi painovoimaa, puristettuun kaasuun varastoitunutta energiaa tai muuta sellaista käyttövoimaa, joka ei edellytä ulkoista voimantähdettä työntämisen aikana. Sammutuksen tulee onnistua, vaikka jotakin yhdessä työnnettävistä neutroniabsorbaattoreista ei pystyttäisi työntämään reaktoriin. Pikasulun käynnistävän reaktorin suojausjärjestelmän on täytettävä (N+2)-vikakriteeri.	Tärkeimpien laitoksen hallittuun tilaan siirtymiseksi ja siinä pysymiseksi tarvittavien turvallisuusjärjestelmien kaapelointien on toteutettava N+2 –vikakriteeri.
YVL B.1 #448	Jälkilämmön poisto reaktorista ja suojarakennuksesta on voitava toteuttaa odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä tai oletetuissa onnettomuuksissa yhdellä tai usealla (N+2)-vikakriteerin ja 72 tunnin omavaraisuusehdon yhdessä täyttävällä järjestelmällä siten, että polttoaineen eheydelle, radiologisille vaikutuksille ja ylipainesuojaukselle ao. suunnitteluperusteluokassa DBC2, DBC3 tai DBC4 asetetut raja-arvot eivät ylitä. Jos jälkilämmönpoistojärjestelmissä tai niiden tukijärjestelmissä on sellaisia passiivisia laitteita, joiden vikaantumisen todennäköisyys odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä tai oletetuissa onnettomuuksissa on hyvin pieni, näihin laitteisiin voidaan soveltaa (N+1)-vikakriteeriä (N+2)-vikakriteerin sijasta.	
YVL B.1 #5455	Ydinvoimalaitoksen turvallisuusluokitellut sähkö- ja automaatiojärjestelmät, -laitteet sekä niiden kaapeloinnit ja asennukset on suojattava luo-	Kaapeloinnin EMC-vaatimusmäärittelyssä, -suunnittelussa ja -toteutuksessa on suositeltavaa käyttää

	tettavasti sähkömagneettisten häiriökenttien vaikutuksilta.	kansainvälistä teollisuusympäristöä koskevaa EMC-standardia kuten IEC 61000.
YVL B.1 #5458	Turvallisuusluokitelluille sähkö- ja automaatiojärjestelmille sekä -laitteille on määriteltävä yksityiskohtaiset EMC-vaatimukset vaatimusmäärittelyssä.	
YVL B.1 #5459	EMC-vaatimusten peruslähtökohtana voivat olla teollisuusympäristöä koskevat yleiset kansainväliset EMC-standardit. Näiden vaatimuksia on tarvittaessa täydennettävä ottamalla huomioon laitteiden sijoituspaikoilla mahdollisesti vallitsevat vaativammat EMC-olosuhteet.	
YVL E.7 #558	Sähkö- ja automaatiolaitteiden sekä asennusten EMC vaatimustenmukaisuus on osoitettava standardien mukaisilla EMC-testeillä tai analyyseillä.	
YVL B.1 #5317	Valvomon ja varavalvomon ohjausten keskinäinen riippumattomuus on toteutettava käyttäen fyysistä ja toiminnallista erottelua. Minkään palo-osaston tuhoutuminen ei saa aiheuttaa sekä valvomon että varavalvomon ohjausten menettämistä.	Valvomon ja varavalvomon kaapeloinnit tulee erotella fyysisesti ja toiminnallisesti. Minkään palo-osaston sisältämän kaapeloinnin tuhoutuminen ei saa aiheuttaa sekä valvomon että varavalvomon ohjausten menettämistä.
YVL B.8 #371	Varavalvomon ohjausjärjestelmät on erotettava valvomon ohjausjärjestelmistä omiin palo-osastoihinsa siten, että valvomon tai muun yksittäisen palo-osaston sisältämien laitteiden menetys ei estä sekä valvomon että varavalvomon ohjausjärjestelmien toimintaa. Vastaava vaatimus pätee myös varavalvomon välttämättömiä toimintoja täydentäville valvomoiden ulkopuolisille varaohjauspaikoille.	
YVL B.1 #5404	Laitoksen ulkoiset ja sisäiset sähkötehon syöttölähteet on suunniteltava siten, että yksittäisen syöttölähteen menetyksestä seuraava tai samasta syystä aiheutuva jäljelle jääneiden syöttölähteiden menetys on erittäin epätodennäköistä.	Laitoksen eri sähkötehon syöttölähteiden kaapeloinnit on erotettava toisistaan niin, että useamman kuin yhden syöttölähteen kaapeloinnin vaurioituminen saman tapahtuman seurauksena on erittäin epätodennäköistä.
YVL E.7 #309	Turvallisuusluokan 2 sähkölaitteiden ja kaapeleiden sekä niiden onnettomuudessa tarvittavien turvallisuusluokan 3 sähkölaitteiden ja kaapeleiden, joille on asetettu erityisvaatimuksia ympäristöolosuhdekestoisuudesta, suunnittelun, valmistuksen ja testauksen on perustuttava suomalaisiin tai kansainvälisiin sähkölaitestandardeihin sekä soveltuvin osin ydinteknisiin standardeihin ja ohjeisiin.	Kaapeloinnin erottelussa on sovellettava ydinteknisiä standardeja kuten IEEE 384 ja/tai IEC 60709.

YVL B.7 #324	Ohjeen YVL B.1 mukaan sellaisissa tiloissa, joissa turvallisuuslohkoja ei voida rakentaa erillisiksi osastoiksi, ne on eroteltava toisistaan osittain erottelevilla rakenteilla tai riittävällä etäisyydellä. Kyseisissä tapauksissa käytettävissä erotteluratkaisuissa on otettava huomioon palontorjunnan syvyyspuolustusperiaate [YVL B.8] ja niitä on perusteltava analyyseilla. Esimerkkejä kyseisistä tapauksista ovat suojarakennus sekä valvomo ja sen alapuoliset kaapelitilat.	Suojarakennuksen ja valvomon kaapeloinnin erotteluun voi olla hankala soveltaa muualla laitoksella käytettyjä erotteluperiaatteita. Tällöin erottelu on tehtävä muilla tavoilla niin hyvin kuin käytännöllisesti on mahdollista.
YVL B.8 #367	Suojarakennuksen sisäpuolella olevan palokuorman pitää olla mahdollisimman pieni. Turvallisuusjärjestelmien laitteet mukaan lukien kaapelit ja impulssiputket on sijoitettava ja suojattava siten, että mahdollisen palon vaikutus rajoittuu vain yhteen turvallisuuslohkoon.	Suojarakennuksen kaapeloinnin läpiviennit tulee sijoittaa mahdollisimman etäälle toisistaan.
YVL B.8 #372	Valvomoon tulevien, turvallisuuden kannalta tärkeiden eri turvallisuuslohkojen kaapelit on eroteltava omiin palo-osastoihin. Jos eri osajärjestelmien kaapelit joudutaan poikkeuksellisesti sijoittamaan samaan palo-osastoon, on kaapelit eroteltava tilan sisällä käyttäen etäisyyttä, palonkestäviä rakenteita ja eristämistä. Lisäksi palo-osasto on varustettava tehokkailla ja luotettavilla paloilmoin- ja sammutusjärjestelmillä. Esi-merkkinä tällaisesta tilasta on valvomopöydän alapuolinen kaapelitila.	Valvomon kaapeloinnissa, jossa eri turvallisuuslohkojen kaapeleita joudutaan sijoittamaan samaan palo-osastoon, tulee erottelun riittävä toteutuminen varmistaa etäisyydellä, rakenteilla ja automaattisilla palontorjuntajärjestelmillä.